



Mestrado em Engenharia Mecânica

**Avaliação do Desgaste da Ferramenta e
Outros Trabalhos de Maquinagem CNC
Aplicação do Sinal de Vibração e das Redes Neurais
na Previsão do Desgaste da Ferramenta**

Trabalho de Projeto apresentado para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica
Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos

Autor

Ricardo Santos Morais

Orientador

Fernando António Gaspar Simões

Professor do Departamento de Engenharia Mecânica
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, fevereiro, 2018

Agradecimentos

Quero agradecer a todos aqueles que contribuíram e tornaram possível a realização da presente dissertação de mestrado. Em especial:

Ao meu orientador, Prof. Doutor Fernando António Gaspar Simões, pelo seu empenho, dedicação, disponibilidade, pelo vasto conhecimento transmitido e a constante motivação que me transmitiu ao longo do meu percurso académico.

Ao Paulo Amaro, pelo conhecimento transmitido e ideias sugeridas.

À empresa Palbit® pela oferta de ferramentas e materiais utilizados nos ensaios de maquinaria.

Ao Prof. Doutor Luís Manuel Ferreira Roseiro, responsável pelo Laboratório de Biomecânica Aplicada, onde foram realizados os ensaios de maquinaria.

Ao Professor Carlos Alcobia pelo empenho e conhecimentos transmitidos na parte do software de aquisição das vibrações e instalação do acelerómetro.

À minha família e namorada pelo seu apoio incondicional, compreensão, e incentivos transmitidos, na superação dos obstáculos que ao longo desta etapa foram surgindo, e também pela sua ajuda na revisão do trabalho

Por fim, não poderia deixar de agradecer aos meus amigos e colegas por toda a sua amizade, companheirismo, compreensão, solidariedade e espírito de entreajuda que se estabeleceu entre nós, ajudando à conclusão do curso.

Resumo

O projeto tem como base o conhecimento adquirido, anteriormente, em diversas unidades curriculares da Licenciatura e Mestrado em Engenharia Mecânica, do ISEC, as quais estão relacionadas com programação e fabrico de componentes mecânicos com sistemas CAD/CAM aplicados em máquinas-ferramenta CNC. O trabalho desenvolvido passou por uma aprendizagem inicial dos procedimentos e rotinas de um centro de maquinagem de 3 eixos. Posteriormente, focou-se num centro de maquinagem de 5 eixos, onde foi desenvolvido o principal objetivo do trabalho de projeto.

Em resultado da colaboração entre o Laboratório de Fabrico Assistido por Computador do ISEC com a empresa Palbit®, foi aprofundado o interesse em relacionar o processo de maquinagem do aço inox duplex com o sinal de vibração adquirido pelo sistema que foi implementado no centro de maquinagem. Durante a componente experimental do trabalho foi aplicado a um bloco de aço inoxidável duplex uma estratégia de corte trocoidal, avaliando o desgaste ocorrida na face de saída, da pastilha, da ferramenta de corte.

Neste trabalho foram delineados três grandes objetivos. O objetivo principal foi criar um modelo de lógica difusa (ANFIS) que permita prever o desgaste da ferramenta, sob condições e parâmetros de corte pré-definidos, sendo uma das variáveis de entrada o sinal de vibração. Outro dos objetivos está relacionado com o principal, que passa por otimizar o sistema de aquisição de vibração, anteriormente implementado, de modo a ser possível obter os sinais de vibração na árvore da fresadora e relacioná-los com o desgaste da ferramenta. O último objetivo passa por fabricar um sistema de moldagem que permita compactar e obter geometrias complexas, utilizando aglomerados de cortiça.

No final deste trabalho e, durante o processo de aquisição de sinal de vibração em diferentes condições, foi criado um modelo de lógica difusa, de modo a demonstrar o potencial deste tipo de solução em trabalhos futuros.

Palavras chave: Aço inoxidável duplex, FFT, Análise em oitavas, RMS, Estratégia trocoidal, 5 eixos, Molde de compactação de cortiça, Desgaste da ferramenta de corte, Lógica difusa.

Abstract

This project is based on the knowledge acquired in several curricular units of the Degree and Masters in Mechanical Engineering, at ISEC, which relates to mechanical components programming and manufacturing using CAD / CAM applied systems in CNC machine tools. The developed work, passed by an initial learning of the procedures and routines of a 3-axis machining center. Subsequently, it focused on a 5 - axis machining center, where the main objective of this project was performed.

As a result of a collaboration that has been developed between Computer Assisted Manufacturing Laboratory, of ISEC, and the Palbit® company, the interest in relating the duplex stainless steel machining process using the acquired vibration signal acquired by the system that was implemented in the machining center was further deepened. During the experimental component of the work, a trochoidal cutting strategy was applied to a duplex stainless-steel block, evaluating the tool wear on the outlet face on the insert.

In this work were outlined three goals. The main goal was to create a diffuse logic model (ANFIS) that allows the prediction of the tool wear under pre-defined conditions and cutting parameters, using the vibration signal as one of the input variables. One of the other objectives, is related to the main one, which is to optimize the vibration acquisition system, previously implemented, so that it is possible to obtain the vibration signals in the tree of the milling machine and relate them with the tool wear. The last objective is to manufacture a molding system, which allows the process of compactation and the achievement of complex geometries, using cork agglomerates.

At the end of this work and during the process of vibration signal acquisition in different conditions, a diffuse logic model was created in order to demonstrate the potential of this type of solution in future works.

Keywords: Duplex stainless steel, FFT, Octave analysis, RMS, Trochoidal strategy, 5 axis, Cork compacting mold, Cutting tool wear, Fuzzy logic.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	- 1 -
1.1 - Enquadramento do Tema e Objetivos.....	- 1 -
1.2 - Organização do Documento	- 3 -
Capítulo 2 – Enquadramento Teórico do trabalho experimental.....	- 5 -
2.1 Enquadramento do Trabalho Experimental	- 5 -
2.2. Caracterização dos Aços Inoxidáveis	- 6 -
2.3 Tipos de desgaste na ferramenta de corte	- 9 -
2.3.1 Desgaste de Cratera	- 10 -
2.3.2 Desgaste Frontal ou de Flanco	- 10 -
2.3.3 Desgaste de Entalhe	- 11 -
2.4 Medição do desgaste e da vida útil das ferramentas	- 11 -
2.5 Estudo da Vibração	- 15 -
2.5.1 Parâmetros das Vibrações	- 15 -
2.5.1.1 RMS	- 16 -
2.5.1.2 FFT.....	- 17 -
2.5.1.3 Oitavas	- 17 -
2.5.2 Teorema da Amostragem.....	- 18 -
2.5.3 Análise Gráfica no Domínio do Tempo e Frequência	- 19 -
Capítulo 3 -Trabalho Experimental de Avaliação do Desgaste e de Aquisição do Sinal de Vibração	- 21 -
3.1 Enquadramento da Componente Experimental	- 21 -
3.2 Condições Experimentais Implementadas	- 22 -
3.2.1 Centro de Maquinagem.....	- 22 -
3.2.2 Material maquinado nos ensaios	- 23 -
3.2.3 Caracterização da Ferramenta de Corte	- 23 -
3.2.3 Aquisição de Imagens e Medição do Desgaste	- 24 -
3.2.4 Software CAM e Estratégia de Maquinagem.....	- 25 -
3.2.4.1 Software de Fabrico Assistido por Computador	- 25 -
3.2.4.2 Estratégia Trocoidal	- 26 -
3.2.5 Parâmetros de Corte.....	- 28 -
3.2.6 Implementação do Sistema de Aquisição do Sinal de Vibração	- 29 -
3.2.6.1 Software Utilizado	- 29 -
3.2.6.2 Acelerómetro e Placa de Aquisição	- 30 -

3.3 Estudo do Desgaste da Ferramenta	34 -
3.3.1 Ensaios Realizados	34 -
3.3.2 Interpretação dos Resultados Obtidos	36 -
Capítulo 4 - Previsão do desgaste da ferramenta de corte.....	45 -
4.1 Redes Neurais.....	45 -
4.1.1 Redes Neurais Artificiais	45 -
4.1.2 Algoritmo de Treino da Rede.....	49 -
4.2 Lógica difusa.....	51 -
4.2.1 ANFIS –Adaptative Neuro Fuzzy Interference System	51 -
4.2.2 Metodologia de treino	52 -
4.3 Modelo ANFIS aplicado no processo de maquinagem	55 -
4.4 Realização dos testes do modelo ANFIS	58 -
4.5 Conclusão sobre a previsão do desgaste da ferramenta.....	64 -
Capítulo 5 – Fabrico de um Produto Através de um Molde de Compactação de Cortiça ...	65 -
5.1 Introdução	65 -
5.2 Características da cortiça	66 -
5.3 Processo de moldagem	66 -
5.4 Trabalho a realizar	67 -
5.5 Projeto, fabrico e funcionamento do molde de compactação	68 -
5.5.1 Geometria e componentes do molde.....	68 -
5.5.2 Alinhamento do molde.....	69 -
5.5.3. Sistema de Enchimento.....	70 -
5.5.4 Posição Final do Êmbolo de Compactação	72 -
5.6 Processo de compactação e cura da cortiça	74 -
5.6.1 Equipamento e materiais utilizados.....	74 -
5.6.2 Etapas do processo de compactação da cortiça	75 -
5.6.3 Processo de cura e desmoldagem	76 -
5.7 Influência da granulometria da cortiça	77 -
5.8 Otimização do processo	78 -
5.9 Conclusões	84 -
Capítulo 6 - Trabalhos de programação CAM e maquinagem CNC	85 -
6.1. Enquadramento	85 -
6.2 Exemplo de trabalho realizado: Suporte.....	86 -
6.2.1 Maquinagem a 3 eixos	86 -

6.2.1.1 Bloco e zero-peça	- 86 -
6.2.1.2 Ciclos de maquinagem e simulação do processo.....	- 87 -
6.2.2 Maquinagem a 5 eixos	- 89 -
6.2.2.1 Bloco e zero-peça	- 89 -
6.2.2.2 Ciclos de maquinagem e simulação do processo.....	- 90 -
Capítulo 7 - Conclusões e propostas de trabalhos futuros	- 93 -
7.1 Conclusões	- 93 -
7.2 Propostas de trabalhos futuros	- 94 -
Capítulo 8 - Referências Bibliográficas	- 95 -

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 - Índice de maquinabilidade para diferentes tipos de aços inoxidáveis (Sandvik, 2010)	8 -
Figura 2.2 - Esquema representativo das principais áreas de desgaste na ferramenta de corte: A- Aresta de saída principal; B- Aresta de saída secundária; C – Face de saída (ou incidência) principal; D – Apara Aderente na face de ataque	9 -
Figura 2.3 Desgaste de cratera (Sandvik, 2017).....	10 -
Figura 2.4 Desgaste frontal ou de flanco (Sandvik, 2017).....	10 -
Figura 2.5 Desgaste de entalhe (Sandvik, 2017)	11 -
Figura 2.6 - Representação do desgaste de flanco uniforme e sua vista de corte (ISO-8688-1, 1989)	12 -
Figura 2.7 - Representação do desgaste de flanco não uniforme e sua vista de corte (ISO-8688-1, 1989).....	12 -
Figura 2.8 - Representação do desgaste de flanco localizado e sua vista de corte (ISO-8688-1, 1989)	13 -
Figura 2.9 - Representação do desgaste em forma de cratera e sua vista de corte (ISO-8688-1, 1989)	13 -
Figura 2.10 - Representação do desgaste em forma de escada e sua vista de corte (ISO-8688-1, 1989).....	13 -
Figura 2.11 - Critérios para determinar o fim de vida útil da ferramenta quando sujeita a desgaste de flanco (ISO-8688-1, 1989).....	14 -
Figura 2.12 - Critérios para determinar o fim de vida útil da ferramenta quando sujeita a desgaste da face de ataque (ISO-8688-1, 1989)	14 -
Figura 2.13 - Evolução do desgaste na face de saída (VB) em função do tempo de corte ..	15 -
Figura 2. 14 - a) Decomposição dos harmônicos de uma onda; b) Junção dos harmônicos de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014)	16 -
Figura 2.15 - Representação gráfica do valor de RMS de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014)	16 -
Figura 2.16 - Representação gráfica de um sinal em FFT (OBS, 2017).....	17 -
Figura 2.17 - Exemplo da conversão de um sinal para análise de oitavas (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014)	18 -
Figura 2.18 - Gráfico de uma análise em oitavas (esquerda) e 1/3 de oitavas (direita) (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014)	18 -

Figura 2.19 - Passagem de um sinal no domínio do tempo para o domínio de frequência (National Instruments, 2017).....	20 -
---	------

Capítulo 3

Figura 3.1 - Representação do processo de facejamento do bloco, a ser realizado nos ensaios experimentais (ISO 8688-1)	21 -
Figura 3.2 - Fixação do bloco de aço inoxidável duplex	22 -
Figura 3.3 - Centro de maquinagem HAAS UMC 750SS	22 -
Figura 3.4 - Ferramenta de corte utilizada nos ensaios: a) Vista de frente; b) Vista de topo (3 gumes de corte); c) Pastilha PH 7930 (Amaro, 2017)(Adaptado).....	24 -
Figura 3.5 - Porta-ferramentas weldon com pino de fixação CAT 40X45° M16 (Amaro, 2017)	24 -
Figura 3.6 - Aquisição de imagem: a) Interface do software Dino Capture 2.0; b) Lupa de aquisição de imagem.....	24 -
Figura 3.7 - Interface do software Axion Vision LE usado para medir o desgaste das ferramentas	25 -
Figura 3.8 - Interface do software de fabrico assistido por computador Mastercam® X9 ..	25 -
Figura 3.9 - Simulação do ensaio experimental no software Mastercam® X9: a) Sentido de rotação da ferramenta; b) Sentido da trajetória da ferramenta	26 -
Figura 3.10 – Movimento da ferramenta de corte em fresagem trocoidal (Sandvik, 2010) -	27 -
Figura 3.11 - Profundidade de corte (a_p) e largura de corte (a_e) na fresagem tradicional e na fresagem trocoidal (Mastercam, 2015)	27 -
Figura 3.12- Layout do menu principal do programa criado no Software Laview® da National Instruments (Mendes, 2016).....	30 -
Figura 3.13 - Acelerómetro da marca PCB modelo 356B08 (GlobalSpec, 2017)	30 -
Figura 3.14 - Esquema da estratégia de montagem adesiva.....	31 -
Figura 3.15 - Representação da peça maquinada, utilizada, para fixar o acelerómetro à árvore da fresadora: a) Ponto de aplicação; b) Face que coincidente com a superfície da árvore da fresadora	31 -
Figura 3.16 - a) Montagem do acelerómetro no centro de maquinagem; b) Orientação dos eixos do centro de maquinagem e do acelerómetro	32 -
Figura 3.17 - Placa de aquisição de dados NI USB 9234	32 -
Figura 3.18 - Taxa de aquisição utilizada nos ensaios (Hz).....	33 -
Figura 3.19 - Representação esquemática do procedimento experimental	34 -
Figura 3.20 - Layout do programa criado no Software LabView®, utilizado durante a aquisição do sinal	35 -

Figura 3.21 - Observação da aresta de corte observada na face de saída, com indicação do comprimento da aresta utilizada durante o corte	36 -
Figura 3.22 - Aresta de corte antes de ser submetida a trabalho e o respectivo sinal de vibração adquirido com a ferramenta a rodar em vazio	36 -
Figura 3.23 - Representação esquemática do desgaste de flanco e de entalhe, e observação dos mesmos na pastilha de corte	37 -
Figura 3.24 - Evolução do desgaste (mm) de flanco (VB_1) em função do tempo (min) de maquinagem nos gumes da ferramenta de corte, durante o ensaio 1	38 -
Figura 3.25 - Evolução do desgaste (mm) de entalhe (VB_3) em função do tempo (min) de maquinagem nos gumes da ferramenta de corte, durante o ensaio 1	39 -
Figura 3.26 - Representação gráfica (Ensaio 1, decorridos 5 minutos) da análise FFT vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3	40 -
Figura 3.27 - Representação gráfica (Ensaio 1, decorridos 10 minutos) da análise FFT vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3.....	40 -
Figura 3.28 - Representação gráfica (Ensaio 1, decorridos 20 minutos) da FFT vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3.....	40 -
Figura 3.29 - Análise gráfica de 1/3 de oitavas (Ensaio 1 decorridos 10 minutos) vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3	41 -
Figura 3.30 - Análise gráfica de 1/3 de oitavas (Ensaio 1 decorridos 20 minutos) vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3	41 -
Figura 3.31 - Análise gráfica de 1/3 de oitavas (Ensaio 1 decorridos 30 minutos) vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3	41 -
Figura 3.32 - Análise gráfica de 1/3 de oitavas (Ensaio 3 decorridos 5 minutos) vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3.....	42 -
Figura 3.33 - Análise gráfica de 1/3 de oitavas (Ensaio 3 decorridos 10 minutos) vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3	42 -

Capítulo 4

Figura 4.1 – Representação de uma Rede Neuronal Artificial (USP, 2017).....	46 -
Figura 4.2 – Esquema de funcionamento de um Neurónio Artificial (Pinto, 2007).....	47 -
Figura 4.3 – Exemplificação do funcionamento de um neurónio humano (esquerda) e uma rede neuronal artificial (direita).....	47 -
Figura 4.4 - Configuração da rede neuronal exemplificando a ação direta e a ação recorrente (Pinto, 2007)	48 -
Figura 4.5 - Esquema de propagação e retropropagação dos sinais (Pinto, 2007)	50 -
Figura 4.6 - Representação de controlador difuso (G.Anuradha, 2017)	52 -

Figura 4.7- Representação gráfica de alguns exemplos de funções de pertença (Pinto, 2007)...	53 -
Figura 4.8 - Representação gráfica dos métodos de desfusão do modelo do tipo Mamdani (Access, 2017)	54 -
Figura 4.9 - Representação gráfica, do método de desfusão, valor médio ponderado (NUUA, 2017)	54 -
Figura 4.10 - Modelo ANFIS utilizado na previsão do desgaste.....	55 -
Figura 4.11 - Configuração do modelo ANFIS	55 -
Figura 4.12 - Previsão do desgaste de flanco utilizando nas variáveis de entrada funções de pertença triangulares, e nas variáveis de saída uma função de pertença constante	58 -
Figura 4.13 – Previsão do desgaste de flanco utilizando nas variáveis de entrada funções de pertença triangulares, e nas variáveis de saída uma função de pertença linear	59 -
Figura 4.14 – Previsão do desgaste de flanco utilizando nas variáveis de entrada funções de pertença trapezoidais, e nas variáveis de saída uma função de pertença constante.....	59 -
Figura 4.15 – Previsão do desgaste de flanco utilizando nas variáveis de entrada funções de pertença trapezoidais, e nas variáveis de saída uma função de pertença linear	60 -
Figura 4.16 – Previsão do desgaste de flanco utilizando nas variáveis de entrada funções de pertença radiais, e nas variáveis de saída uma função de pertença constante	60 -
Figura 4.17 – Previsão do desgaste de flanco utilizando nas variáveis de entrada funções de pertença radiais, e nas variáveis de saída uma função de pertença linear	61 -
Figura 4.18 -Previsão do desgaste de entalhe utilizando nos valores de entrada funções de pertença trapezoidais, e nos valores de saída uma função de pertença constante	63 -
Figura 4.19 - Previsão do desgaste de entalhe utilizando nos valores de entrada funções de pertença trapezoidais, e nos valores de saída uma função de pertença linear	64 -

Capítulo 5

Figura 5.1 - Geometria proposta: a) Vista isométrica; b) Vista frontal; c) Vista lateral.....	65 -
Figura 5.2 - Desenho da peça resultante do molde: a) Vista frontal; b) Vista em perspectiva isométrica; c) Vista Lateral	67 -
Figura 5.3 – Desenho inicial da parte lateral do molde	67 -
Figura 5.4 - Alterações efetuadas no molde: a) Geometria inicial; b) Geometria Final; c) Geometria após a maquinação	68 -
Figura 5.5 - a) Casquilho fabricado; b) Montagem do casquilho sob duas partes laterais do molde; c) Êmbolo que faz a compactação do aglomerado e que se desloca no interior do casquilho.....	69 -

Figura 5.6 - Alinhamento do molde: a) Molde montado; b) Molde aberto; c) Varão roscado; d) Furos realizados; e) Varões roscados inseridos no molde.....	69 -
Figura 5.7 - a) Volume da peça (incluindo a face); b) Volume da peça (excluindo a face) -	70 -
Figura 5.8 - Sistema de enchimento do molde: a) Peça fabricada; b) Sistema de enchimento montado.....	71 -
Figura 5.9 - Haste fabricada, usada sob o êmbolo para compressão da mistura	71 -
Figura 5.10 - a) Êmbolo alinhado na sua posição, com os parafusos apertados; b) Rasgo no êmbolo; c) Rasgo do êmbolo representado no SolidWorks (vermelho);d) Furo realizado no casquilho; e) Verificação do alinhamento do êmbolo na posição final de compactação	72 -
Figura 5.11 - Vis ta explodida do molde em perspectiva isométrica	73 -
Figura 5.12 - Material utilizado nos ensaios: a) Estufa de secagem; b) Balança de precisão; c) Granulado e pó de Cortiça; d) Cola FP240D; e) Spray desmoldante OKS 1501; f) Funil; g) Gobelé; h) Proveta; i) Vareta de vidro	74 -
Figura 5.13- Procedimento Experimental de enchimento e compactação do granulado de cortiça no molde: a) Aplicação do desmoldante; b) e c) Montagem do molde; d) Componentes da mistura; e) Determinação da massa; f) Homogeneização da mistura; g) Inserção do êmbolo; h) Inserção da haste sobre o êmbolo; i) Prensagem hidráulica até o êmbolo atingir a posição final; j) Molde pronto para ser levado à estufa de secagem	76 -
Figura 5.14 - Realização do ensaio: a) Molde na estufa de secagem; b) Abertura do molde; c) Molde da face no êmbolo e resultado obtido.....	77 -
Figura 5.15 - Estudo da Granulometria: a) Ensaio 2; b) Ensaio 1; c) Ensaio 3; d) Ensaio 4-	78 -
Figura 5.16 - a) Resultado no ensaio 5; b) Resultado obtido no 6; c) Resíduos de cola no molde	79 -
Figura 5.17 - Ervas de lavanda utilizadas (esquerda) e resultados obtidos no ensaio 7	80 -
Figura 5.18 - Resultados obtidos no ensaio 8.....	80 -
Figura 5.19 - Resultados obtidos: a) Ensaio 9 (vista frontal); b) Ensaio 9 (Vista Traseira); c) Ensaio 10 (Vista Frontal); d) Ensaio 10 (Vista Traseira); e) Ensaio 11 (Vista Frontal); f) Ensaio 11 (Vista Traseira)	81 -
Figura 5.20 - Cera desmoldante.....	81 -
Figura 5.21 - Resultados obtidos: a) Ensaio 12 (Vista Frontal); b) Ensaio 12 (Vista Traseira); c) Ensaio 13 (Vista Frontal); d) Ensaio 13 (Vista Traseira).....	82 -
Figura 5.22 - Resultados obtidos: a) Ensaio 14 (Vista Frontal); b) Ensaio 14 (Vista Traseira); c) Ensaio 15 (Vista Frontal); d) Ensaio 15 (Vista Traseira)	83 -
Figura 5.23 - a) Trituração das ervas de lavanda; b) Ervas trituradas; c) Resultados do ensaio 16 (Vista Frontal); Resultados do ensaio 16 (Vista Traseira)	83 -

Capítulo 6

Figura 6.1 - Nomenclatura do Sistema de Eixos Lineares e Rotativos (Mendes, 2016)	86 -
Figura 6.2 -Dimensões do bloco usado na maquinagem a 3 eixos	86 -
Figura 6.3 – Posicionamento do suporte e respetivo zero-peça: a) Aperto 1; b) Aperto 2; c) Aperto3.....	87 -
Figura 6.4 - Ciclos de maquinagem utilizados	87 -
Figura 6.5 - Trajetória das ferramentas no aperto 1 e 2: a) Ciclo 1; b) Ciclo 2; c) Ciclo 3; d) Ciclo 4; e) Ciclo 5	88 -
Figura 6.6 - Simulação do processo de maquinagem no Software Mastercam® X9: a) Ciclo 1; b) Ciclo 2; c) Ciclo 3; d) Ciclo 4; e) Ciclo 5; f) Ciclos 6 a 9 (3º aperto)	88 -
Figura 6.7 - Processo de Maquinagem: a) Execução da peça durante o segundo aperto; b) Resultado Final	89 -
Figura 6.8 - Dimensões mínimas do bloco.....	89 -
Figura 6.9 - Aperto e Zero-Peça utilizados	90 -
Figura 6.10 - Ciclos de maquinagem utilizados	90 -
Figura 6. 11 - Trajetória das ferramentas: a) Ciclo 1; b) Ciclo 2; c) Ciclo 3; d) Ciclo 4; e) Ciclo 5; f) Ciclo 6 e 7	90 -
Figura 6.12 - Simulação no software Mastercam® X9: a) Ciclo 2; b) Ciclo 3	91 -
Figura 6.13 - Simulação no software Mastercam® X9: a) Ciclo 4 ; b) Ciclo 5; c) Ciclo 6; d) Ciclo 7	91 -
Figura 6.14 - Resultados obtidos: a) Final do primeiro aperto; b) Final do segundo aperto; c) Resultado Final	92 -

Índice de Tabelas

Capítulo 3

Tabela 3.1 - Composição química dos aços inoxidáveis (utilizado a vermelho)	23 -
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável duplex utilizado nos ensaios	23 -
Tabela 3.3 - Condições experimentais estabelecidas para os parâmetros de corte	29 -
Tabela 3.4 - Parâmetros de corte utilizados em cada ensaio	35 -
Tabela 3.5 - Valores de desgaste de flanco obtidos no ensaio 1	37 -
Tabela 3.6 - Valores de desgaste de entalhe obtidos no ensaio 1	37 -
Tabela 3.7 - Valores de desgaste de flanco obtidos no ensaio 3	43 -
Tabela 3.8 - Valores de desgaste de entalhe obtidos no ensaio 3	43 -

Capítulo 4

Tabela 4.1 - Variáveis de entrada utilizados para treino da rede	57 -
Tabela 4.2 - Variáveis de saída utilizadas para testar a rede	58 -
Tabela 4.3 - Tabela comparativa entre os diferentes tipos de Função de Pertença	61 -
Tabela 4.4 - Variáveis de entrada utilizadas no treino da rede	62 -
Tabela 4.5 - Variáveis de saída utilizadas para testar a rede	63 -

Capítulo 5

Tabela 5.1 - Ensaio realizados para o estudo da granulometria	77 -
Tabela 5.2 - Ensaio realizados para otimização do processo utilizando spray desmoldante ..	79 -
Tabela 5.3 - Ensaio realizados para otimização do processo utilizando cera desmoldante ..	82 -

Índice de Equações

Capítulo 2

(Equação 2.1)..... - 19 -

Capítulo 3

(Equação 3.1)..... - 28 -

(Equação 3.2)..... - 28 -

(Equação 3.3)..... - 33 -

Capítulo 4

(Equação 4.1)..... - 49 -

(Equação 4.2)..... - 49 -

(Equação 4.3)..... - 49 -

(Equação 4.4)..... - 49 -

(Equação 4.5)..... - 52 -

(Equação 4.6)..... - 52 -

(Equação 4.7)..... - 54 -

(Equação 4.8)..... - 56 -

Simbologias e Abreviaturas

2D - Duas dimensões

3D - Três dimensões

a_e - Largura de corte

ANN – Redes Neurais Artificiais (Artificial Neural Networks)

ANFIS - Adaptative Fuzzy Interference System

a_p - Profundidade de corte

CAD - Desenho Assistido por Computador (Computer Aided Design)

CAM - Fabrico Assistido por Computador (Computer-Aided Manufacturing)

CNC - Controlo Numérico Computadorizado 8Computer Numerical Control

DBE - Dibutil Éter

D_c - Diâmetro da fresa

D_{cap} - Diâmetro de corte na profundidade de corte efetiva, a_p

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DIN - Deutsches Institut für Normung

D_m - Largura do canal

D_{vf} - Diâmetro da espiral na trajetória trocoidal

EN - Norma Europeia (European Standard)

FFT - Fast Fourier Tranform

FIS – Fuzzy Interference System

f_z - Avanço por dente

Hz - Hertz

ISEC - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

ISO - International Organization for Standardization

K_T - Profundidade máxima da cratera

K_{T1} - Desgaste de cratera

K_{T2} - Desgaste em forma de escada

n - Velocidade de rotação

OMP40-2 - Optical Machining centre Probe (sonda de medição ótica)

PVD - Deposição Física em fase de Vapor (Physical Vapour Deposition)

RMS – Valor Médio Quadrático (Root Mean Square)

RNA - Rede Neuronal Artificial
RPM - Rotações por minuto
TDM - Time-division multiplexing
USA - United States of America
 V_B - Desgaste médio de flanco
 V_{B1} - Desgaste de flanco uniforme
 V_{B2} - Desgaste de flanco não uniforme
 V_{B3} - Desgaste de entalhe
 $V_{B_{máx}}$ - Desgaste máximo de flanco
VC - Desgaste de entalhe na aresta secundária de corte
 V_c - Velocidade de corte
 V_f - Velocidade de avanço
VN - Desgaste de entalhe na aresta principal de corte
w - Passo radial
 Z_n - Número total de dentes

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Enquadramento do Tema e Objetivos

Na área da maquinagem, a fresagem a 5 eixos é, neste momento, a tecnologia de vanguarda a que as empresas têm acesso. Os equipamentos que possuem esta tecnologia conseguem não só posicionar a ferramenta, como orientá-la em qualquer ponto do espaço, segundo qualquer inclinação, num sistema de coordenadas tridimensional. De forma gradual, todas as empresas começam a adotar esta tecnologia, uma vez que esta acarreta uma série de benefícios.

Neste seguimento, foi adquirido também um centro de maquinagem de 5 eixos da marca HAAS, modelo UMC 750SS, para o laboratório de Biomecânica Aplicada, do Instituto de Investigação Aplicada do Instituto Politécnico de Coimbra. Este centro de maquinagem a 5 eixos permite utilizar estratégias de corte inovadoras que representam uma redução significativa no tempo de maquinagem. Além disso, permite também produzir peças com rigor geométrico e geometrias mais complexas, sem comprometer o resultado final, no que toca à qualidade superficial do produto.

Nas máquinas CNC, os parâmetros de corte tais como a velocidade de avanço, velocidade de corte, profundidade de corte, entre outros, são normalmente escolhidos tendo em conta a experiência, ao nível da maquinagem, dos utilizadores ou com recurso a livros sobre maquinagem. A escolha destes parâmetros pode significar um aumento ou diminuição do tempo de maquinagem, tal como antecipar o fim de vida útil da ferramenta e, pode influenciar a qualidade de acabamento do produto. Assim sendo, os parâmetros de corte devem ser otimizados, tendo em conta o processo a ser realizado, de modo a dar resposta às necessidades, garantindo a qualidade da peça a ser fabricada e assegurar também a durabilidade da ferramenta.

Este tipo de problema pode ser encarado a um nível mais abrangente, como um problema de otimização e controlo. Nas últimas décadas têm ocorrido avanços no que diz respeito à obtenção de soluções mais eficientes em problemas não lineares. Abordagens alternativas tais como redes neurais ('Artificial Neural Networks – ANN') e lógica difusa ('ANFIS'), desempenham cada vez mais um papel relevante na obtenção de soluções de problemas não lineares.

As redes neurais utilizam múltiplos elementos de processamento simples, não lineares, ligados entre si formando uma rede. Através de uma forma iterativa os parâmetros da rede ajustam-se, utilizando um conjunto de dados representativos de ocorrências dos problemas.

Estas características passam por uma formulação analítica que, em segundo plano, traduz a relação entre as diferentes variáveis e a contribuição de cada uma para o problema.

A lógica difusa apresenta como característica principal permitir o tratamento de valores das variáveis em classes de decisão, de uma forma que facilita a modelização da tomada de decisões com base em critérios subjetivos, característicos do ser humano.

O trabalho apresentado insere-se num seguimento lógico de dois trabalhos realizados anteriormente no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. O primeiro (Mendes, 2016) passou por explicar os constituintes, funcionalidades, entre outros aspetos, de um centro de maquinagem de 5 eixos e, numa fase final, implementar um sistema independente do equipamento para aquisição da vibração durante as operações de maquinagem. Relativamente ao segundo trabalho (Amaro, 2017), este passou por avaliar a degradação das ferramentas de corte, utilizando diferentes tipos de pastilhas e de estratégias de maquinagem em aços inoxidáveis duplex.

É neste contexto que surge o interesse em relacionar o processo de maquinagem do aço inoxidável duplex com o sinal de vibração adquirido pelo sistema que foi implementado no centro de maquinagem e, identificar as condições de corte, sendo este o principal trabalho desenvolvido no projeto de mestrado.

Por último, vale a pena mencionar que tendo o trabalho de projeto decorrido no Laboratório de Fabrico Assistido por Computador do DEM/ISEC e no Laboratório de Biomecânica Aplicada, os quais dispõem de diversas máquinas-ferramentas CNC, é usual os colaboradores destes laboratórios participarem no fabrico de diversos componentes mecânicos a 3 e 5 eixos para apoio a aulas, para trabalhos de outros alunos de mestrado, bem como em projetos de investigação e desenvolvimento. Por este motivo, surgiu a oportunidade de participar em diversos trabalhos, sendo apresentado no relatório um exemplo, o qual foi desenvolvido nos centros de maquinagem a 3 e 5 eixos.

Face ao enquadramento apresentado, no âmbito do mestrado em Engenharia Mecânica, o presente trabalho, tem como objetivos definidos:

- O objetivo principal - realizar uma previsão do desgaste, de flanco e de entalhe, da pastilha da ferramenta de corte, com recurso a redes neuronais e lógica difusa;
- Analisar os sinais de vibração, obtidos através de um acelerómetro triaxial, e relacioná-los com o desgaste da ferramenta;
- Criar um sistema que permita a compactação de aglomerados de cortiça, tendo em vista obter uma geometria complexa, utilizando as potencialidades das tecnologias CAD/CAM;
- Operar o centro de maquinagem, executando a programação CAD/CAM para o fabrico de componentes mecânicos.

1.2 - Organização do Documento

Este trabalho encontra-se estruturado em sete capítulos, acrescido das referências bibliográficas consultadas. Inicialmente temos o capítulo introdutório, onde é feita uma breve contextualização do tema de trabalho, apresentam-se os objetivos gerais que fundamentaram a sua execução e apresenta-se também a estrutura do trabalho.

Após o capítulo introdutório, no segundo capítulo, é feito um enquadramento teórico, onde é apresentado um pouco da evolução da maquinagem ao longo dos anos e da importância do estudo da vibração. Além disso, são também apresentadas as características dos aços inoxidáveis, os tipos de desgaste nas ferramentas de corte e, por último, as normas de avaliação do desgaste das ferramentas.

No capítulo 3 define-se a metodologia experimental a ser aplicada na realização dos ensaios, onde são apresentados os equipamentos e materiais utilizados. Além disso, são também apresentados resultados dos testes, de aquisição de sinal de vibração, bem como o tratamento e interpretação dos dados obtidos.

O capítulo 4, numa fase inicial, define o que são redes neuronais e lógica difusa, apresentam-se as suas características, bem como a sua configuração e os métodos de treino. Posteriormente, é apresentado o modelo ANFIS utilizado para conduzir os testes, tal como os resultados obtidos e a interpretação dos mesmos.

No capítulo 5 é feita uma breve introdução do material a ser compactado, a cortiça, e o seu processo de compactação. Seguidamente, são apresentadas as alterações efetuadas ao desenho inicial e, numa fase final, este capítulo faz referência à componente experimental, onde se apresentam os equipamentos, materiais e metodologia utilizada, e por último, apresenta-se uma interpretação dos resultados obtidos.

O capítulo 6 apresenta um breve enquadramento dos processos de maquinagem e da aprendizagem feita numa fase inicial do trabalho. Além disso, apresenta um exemplo do fabrico de um dos componentes realizados ao longo deste trabalho, onde se demonstra o procedimento num centro de maquinagem de 3 eixos e, comparativamente, os processos de fabrico do mesmo componente num centro de maquinagem de 5 eixos.

No capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões deste trabalho e sugerem-se temas de estudo para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Enquadramento Teórico do trabalho experimental

2.1 Enquadramento do Trabalho Experimental

As origens do estudo da vibração levam-nos até à altura em que se começou a desenvolver instrumentos musicais, tais como flautas, instrumentos de percussão e instrumentos de corda, conhecidos desde 3000A.C.

Quanto à origem das teorias da vibração contemporâneas, Robert Hooke (1635-1703), da lei Hooke, estudou vibrações em cordas. Outros nomes conhecidos também estudaram o fenómeno da vibração tais como Isaac Newton (1642-1727), Daniel Bernoulli (1700-1782), Leonard Euler (1707-1783), Joseph Lagrange (1736-1813), Charles Coulomb (1736-1806), Joseph Fourier (1768-1830), Simeon-Denis Poisson (1741-1840).

Após a revolução industrial, onde se deram grandes avanços em tecnologias como turbinas e outros equipamentos rotativos, surgiu uma grande necessidade em analisar, desenhar, medir e controlar o fenómeno da vibração. Dentro dos mais notáveis contribuidores temos Rankine (1820-1872); Kirchhoff (1824-1887); Rayleigh (1842-1919), Laval (1845-1913), Poincaré (1854-1912), Stodola (1859-1943). (Silva, 2000)

O fenómeno de vibração é uma resposta repetitiva, periódica ou oscilatória de um sistema mecânico. O número de ocorrência por ciclo de vibração é denominado de frequência. As vibrações podem ocorrer naturalmente num sistema mecânico e podem servir para representar o seu comportamento natural e dinâmico. Estas vibrações podem ser forçadas, através de forças de excitação, as quais podem ser geradas internamente no sistema, ou transmitidas para o sistema através de fatores externos.

As aplicações do estudo da vibração encontram-se em vários ramos da engenharia tais como engenharia aeronáutica e aeroespacial, civil, mecânica, e até mesmo eletrotécnica. Normalmente são necessários modelos analíticos ou computacionais para analisar a vibração num sistema mecânico, podendo também ser úteis na fase do desenho e desenvolvimento, de modo a obter um bom desempenho no que diz respeito às vibrações. A monitorização, teste e experimentação da vibração são também importantes à implementação, manutenção e reparação dos sistemas mecânicos.

Este conhecimento é muito útil, independentemente da área de aplicação ou do ramo de engenharia. Qualquer sistema de engenharia pode sofrer oscilações forçadas independentemente da sua capacidade de dissipar energia.

No que diz respeito à área da maquinação, muitos dos estudos da vibração recentes centram-se nos seguintes temas:

- Nas velocidades de operação da maquinaria, as quais têm aumentado cada vez mais ao longo dos anos e, conseqüentemente as cargas geradas pela vibração devido às excitações rotacionais e a desalinhamentos;
- Na produção de peças com menor peso, e geometrias mais complexas, estando mais sujeitas a efeitos indesejados provocados pela vibração.

De modo a manter um alto desempenho a nível da maquinação e da eficiência de produção, e prolongar a duração das ferramentas de maquinação, é crucial planejar e controlar o efeito da vibração no processo industrial. (Silva, 2000)

2.2. Caracterização dos Aços Inoxidáveis

O aço inox duplex está-se a tornar cada vez mais comum, devido a algumas vantagens que este material oferece tais como:

- A sua elevada resistência mecânica;
- Resistência à fissuração;
- Boa resistência à corrosão, particularmente à corrosão sob tensão;
- Estabilidade do seu preço no mercado.

Este material teve origem na década de 1920 onde foi feita a primeira fundição em Avesta na Suécia. No entanto, só apenas nos últimos 30 anos é que os aços inox duplex começaram a ter relevância, devido à evolução das técnicas de fabrico, especialmente no que diz respeito ao controlo da composição de nitrogénio.

Os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos são relativamente fáceis de fabricar e, como o seu nome indica, são constituídos maioritariamente por uma fase, austenite ou ferrite. (BSSA, 2017)

Os austeníticos são ligas não-magnéticas de ferro-crómio-níquel contendo tipicamente 8% de níquel, com baixo teor de carbono. Apresentam boas propriedades mecânicas, boa soldabilidade. A adição de elementos de liga como o molibdénio e a redução do teor do carbono melhoram sua resistência à corrosão. Por outro lado, temos como desvantagens a sua baixa tensão de cedência, 290MPa (aço inox austenítico 304), e uma baixa resistência á corrosão sob tensão. Por último, a presença de níquel torna o seu preço mais elevado e volátil.

Quanto aos ferríticos, estes são ligas de ferro-crómio contendo 12 a 17% de crómio e baixo teor de carbono. São magnéticos e apresentam boa resistência à corrosão em meios menos agressivos, boa ductilidade e razoável soldabilidade. O aço inox ferrítico mais comum é o 430, apresenta uma tensão de cedência de 310 MPa e possui uma quantidade de crómio superior a 16%. Essa quantidade proporciona alguma resistência à corrosão, no entanto sacrifica outras

propriedades tais como a resistência ao impacto, fraca soldabilidade em secções mais espessas e baixa tenacidade a baixas temperaturas. (Carbó, 2008)

De maneira simplificada, podemos dizer que os aços inoxidáveis duplex apresentam uma composição química, na qual temos uma mistura de austenite e ferrite em quantidades aproximadamente iguais (geralmente são azeítos equilíbrios de fase na faixa de 30 a 70% de ferrite e austenite, respetivamente). Este balanço permite-nos o seguinte:

- Maior tensão de cedência (entre 400 e 550 MPa), o que pode levar a uma redução de peso, permitindo a sua aplicação em reservatórios sobre pressão e tanques de armazenamento;
- Boa soldabilidade em secções mais espessas, não de forma tão direta como nos austeníticos, mas definitivamente melhor que nos ferríticos;
- Maior resistência à corrosão sob tensão, o que permite a sua aplicação em tanques de água quente e estruturas de piscinas de natação. (BSSA, 2017)

As propriedades mecânicas superiores dos aços inoxidáveis dúplex em relação aos outros tipos de aços inoxidáveis são o fator decisivo para a utilização crescente desses materiais em aplicações de grande importância, tais como: indústria química, indústria de extração de gás e petróleo, construção de infraestruturas, equipamentos médicos, entre outros (Infomet, 2017)

Relativamente à maquinabilidade dos aços inoxidáveis, estes apresentam diferenças significativas relativamente a outros metais, tais como os aços de baixos teor em carbono, os ferros fundidos ou as ligas de alumínio, sendo estes apenas alguns exemplos. A maioria dos aços inoxidáveis é difícil de maquinar devido principalmente à sua baixa condutividade térmica, alta ductilidade e da tendência em formar aparas longas e flexíveis, que podem aderir à superfície da face de ataque permanecendo “soldadas” à aresta de corte da ferramenta. Como resultado da avara aderente a vida útil da ferramenta é reduzida, provocando também um efeito negativo no acabamento superficial da peça (Ferreira, 2015).

Dependendo dos elementos de liga, tratamento térmico e processo de produção a maquinabilidade dos aços inoxidáveis pode ser muito díspar. Em geral, esta diminui com o aumento do teor de elementos de liga, como o crómio, o níquel, o molibdénio e titânio (Sandvik, 2010).

Quando comparamos o índice de maquinabilidade (também designado por maquinabilidade relativa) entre os diferentes tipos de aços inoxidáveis (Figura 2.1) podemos observar que estes apresentam valores muito diferentes, 100% para os aços inoxidáveis ferríticos e aproximadamente 30% para os aços duplex.

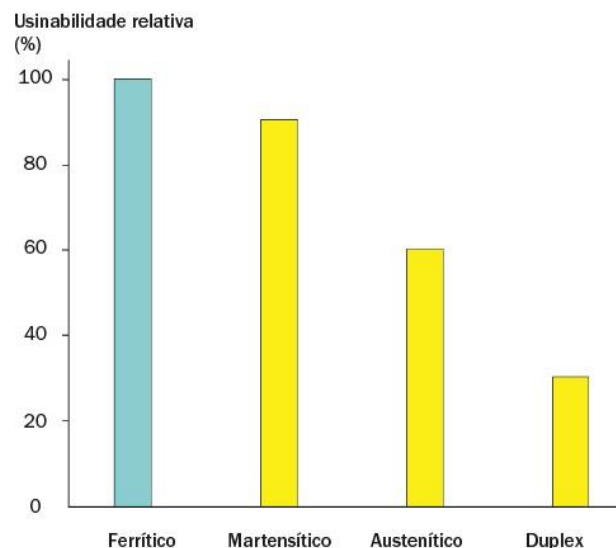


Figura 2.1 - Índice de maquinabilidade para diferentes tipos de aços inoxidáveis (Sandvik, 2010)

Os aços inoxidáveis ferríticos têm geralmente boa maquinabilidade, comparativamente aos aços de baixo teor em carbono (Sandvik, 2010), este atributo pode ser explicado pela presença de aditivos como o enxofre que melhoram a maquinabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos (Machado, Coelho, Abrão, & da Silva, 2009).

Os aços inoxidáveis martensíticos com alto teor em carbono são difíceis de maquinar, devido à elevada dureza causada fundamentalmente pela presença de partículas duras e abrasivas de carboneto de cromo na matriz, aumentando assim o desgaste das ferramentas (Anselmo, Marcondes, & Coppini, 2013).

Quanto aos aços inoxidáveis austeníticos e duplex, estes têm propriedades que lhes conferem uma maquinabilidade díspar comparativamente aos aços inoxidáveis ferríticos ou martensíticos.

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam um índice de maquinabilidade próximo de 60%. Esta dificuldade deve-se principalmente à maior ductilidade do material e à sua alta taxa de endurecimento por deformação plástica. Adicionalmente é provocado um aumento de temperatura, pois são necessárias maiores forças de corte, podendo causar a formação de aparas aderente na aresta de corte, provocando um desgaste acelerado da ferramenta (Centimfe, 2003); (Machado, Coelho, Abrão, & da Silva, 2009).

Outras características que dificultam a maquinagem dos aços inoxidáveis em geral, e do aço austenítico em particular, são a baixa condutividade térmica dos mesmos (que dificulta a dissipação do calor na zona de corte), o alto coeficiente de atrito (que provoca o aumento das forças de corte e da temperatura) e o elevado coeficiente de dilatação térmica (que pode comprometer as tolerâncias das peças) (Anselmo, Marcondes, & Coppini, 2013).

O índice de maquinabilidade dos aços inoxidáveis duplex apresenta um valor mais baixo, normalmente cerca de 30% (Figura 2.1). Esta superior dificuldade no processo de maquinagem, deve-se principalmente à sua maior dureza e alta velocidade de endurecimento por deformação plástica (Sandvik, 2010).

As operações de maquinagem dos aços inoxidáveis duplex geralmente reduzem a vida útil da ferramenta ou exigem tempos de maquinagem mais longos, quando comparados com os austeníticos padrão, porque são necessárias maiores forças de corte. Para além disso a apara resultante do corte dos aços inoxidáveis duplex é difícil de formar, grossa e abrasiva para a ferramenta, devido à elevada resistência destes materiais, especialmente nos aços que possuem mais elementos de liga (Sandvik, 2010); (IMOA, 2012).

Os aços duplex apresentam valores para a tensão de cedência normalmente duas vezes maiores que os aços inoxidáveis austeníticos sem nitrogénio, e a taxa inicial de endurecimento quando trabalhados é pelo menos comparável aos aços inoxidáveis austeníticos comuns. Por estas razões os aços inoxidáveis duplex são tipicamente mais difíceis de serem maquinados que os aços inoxidáveis austeníticos (da serie 300), com resistência à corrosão equivalente (IMOA, 2012).

2.3 Tipos de desgaste na ferramenta de corte

Sendo um dos objetivos deste trabalho relacionar o desgaste da ferramenta com os sinais de vibração adquiridos, é também importante conhecer os mecanismos causadores do desgaste da ferramenta. Mesmo que a ferramenta possua tenacidade suficiente para evitar uma avaria, esta está sempre sujeita ao desgaste. Durante a maquinagem, a ação do corte altera a forma geométrica original da ferramenta, pois verificam-se desgastes contínuos e progressivos normalmente em duas regiões adjacentes à aresta de corte, a face de ataque e a face de saída (Figura 2.2).

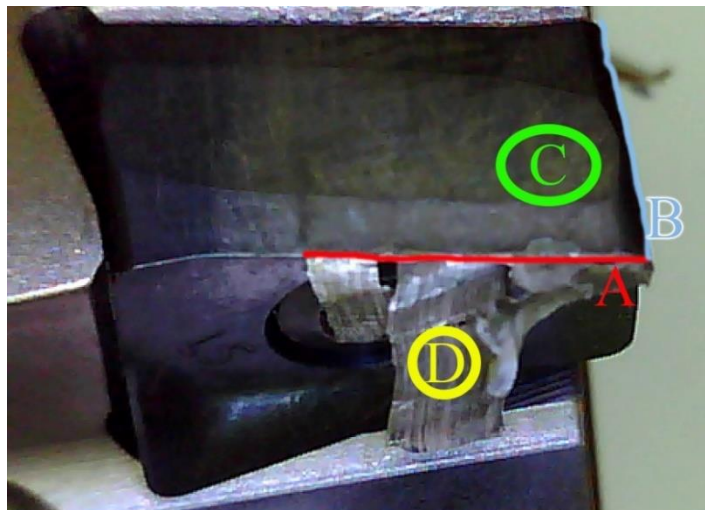


Figura 2.2 - Esquema representativo das principais áreas de desgaste na ferramenta de corte: A- Aresta de saída principal; B- Aresta de saída secundária; C – Face de saída (ou incidência) principal; D – Apara Aderente na face de ataque

Existem três tipos principais de desgaste de ferramenta: desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe. (Amaro, 2017)

2.3.1 Desgaste de Cratera

O desgaste de cratera (Figura 2.3) acontece na superfície da face de ataque da ferramenta provocado pelo atrito entre a apra e a ferramenta e, ocorre principalmente a altas velocidades de corte, devido às altas temperaturas geradas, o que favorece o mecanismo de desgaste por difusão. Este mecanismo de desgaste por difusão ocorre entre o material da peça e a ferramenta. Devido à redução da resistência à abrasão causada pela difusão é favorecido o desgaste abrasivo sendo, então, a forma da cratera resultante da distribuição de tensões na superfície de saída da ferramenta. O desgaste assume, então, a forma de uma cratera alongada com as extremidades arredondadas, paralela à aresta de corte. Quando a cratera atinge um tamanho excessivo e se encontra com o desgaste frontal provoca a quebra da ferramenta (Alegre, 2017); (Amaro, 2017).



Figura 2.3 Desgaste de cratera (Sandvik, 2017)

2.3.2 Desgaste Frontal ou de Flanco

O desgaste frontal ou de flanco (Figura 2.4), é o tipo de desgaste mais comum, ocorre na face da saída da ferramenta de corte. O desgaste de flanco atinge tanto a aresta principal de corte como a secundária, ou ambas. Quando atinge a aresta principal de corte, resulta num aumento das temperaturas e forças envolvidas no corte, podendo causar vibrações tanto na ferramenta como na peça. É causado pela abrasão, devido ao atrito entre a ferramenta e a peça, dependendo da existência de partículas duras incrustadas no material da peça. Este tipo de desgaste provoca a deterioração do acabamento superficial da peça, pois modifica totalmente a forma da aresta de corte, podendo originar peças fora da tolerância. O desgaste frontal é normalmente, o principal tipo de desgaste a considerar na avaliação da vida útil de uma ferramenta de corte (Alegre, 2017) (Amaro, 2017).



Figura 2.4 Desgaste frontal ou de flanco (Sandvik, 2017)

2.3.3 Desgaste de Entalhe

É comum este tipo de desgaste ser mais pronunciado na região onde ocorre o contato com a superfície externa da peça do que nas restantes regiões, o que pode ocorrer devido a várias causas, como o corte de uma camada de material endurecido por uma passagem anterior da ferramenta ou ainda oxidado devido às altas temperaturas, exposição ao ar ou ao fluido de corte. Este tipo de desgaste é chamado desgaste de entalhe. Segundo a Sandvik (Sandvik, 2010) este tipo de desgaste é causado pela adesão (solda por pressão da apra), porém, ainda não existe um consenso na literatura que explique exatamente o mecanismo que provoca este tipo de desgaste.

Apesar de nem sempre afetar o processo de corte, o desgaste de entalhe pode ser bastante prejudicial, pois o entalhe costuma ser relativamente profundo, constituindo uma região de concentração de tensões, que pode levar à quebra da ferramenta (Alegre, 2017); (Amaro, 2017).



Figura 2.5 Desgaste de entalhe (Sandvik, 2017)

2.4 Medição do desgaste e da vida útil das ferramentas

Devido ao desgaste progressivo a que estão sujeitas as ferramentas de corte, é necessário definir qual o valor admissível de desgaste e o tempo que as mesmas podem ser utilizadas sem perda das suas capacidades de corte.

De acordo com a norma (ISO-8688-1, 1989), as condições de corte no processo de facejamento podem-se dividir em duas categorias:

- Deterioração da ferramenta onde esta condição é resultante, predominantemente do desgaste da ferramenta;
- Deterioração da ferramenta resultante de outros fenómenos como a quebra da aresta ou deformação plástica.

Normalmente os testes devem ser realizados sem aplicação do fluido de refrigeração. De modo a aumentar a credibilidade dos testes, e para que seja mais fácil comparar resultados, é essencial que a vida da ferramenta seja definida com base no tempo total de corte, para o qual se atingiu o valor do critério de tempo de vida definido para a ferramenta.

Além disso é necessário identificar e classificar os tipos de fenómenos de deterioração da ferramenta. A distribuição do desgaste de flanco subdivide-se em desgaste de flanco uniforme, desgaste de flanco não uniforme e desgaste de flanco localizado.

O desgaste de flanco uniforme (Figura 2.6), que ocorre na superfície da face de saída, normalmente de largura constante e que se estende ao longo de toda a aresta de corte que entra em contacto com o material.

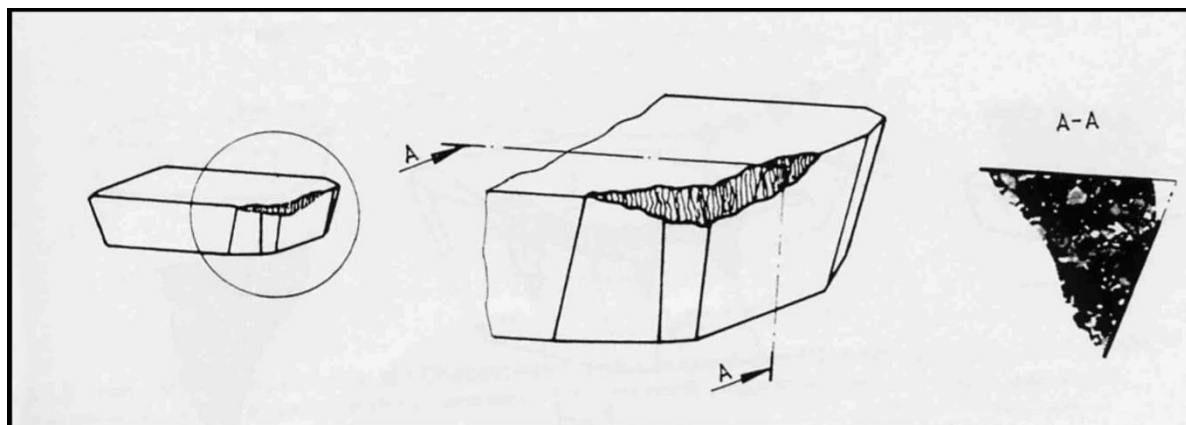


Figura 2.6 - Representação do desgaste de flanco uniforme e sua vista de corte (ISO-8688-1, 1989)

O desgaste de flanco não uniforme (Figura 2.7), que também ocorre na superfície de saída, apresentando largura irregular, sendo o perfil de desgaste, gerado pelo contacto entre a ferramenta e o material, onde o valor medido varia ao longo da superfície de contacto.

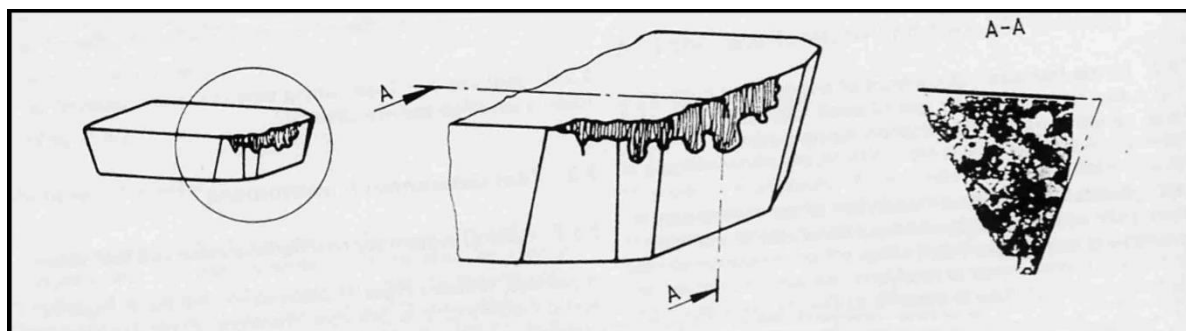


Figura 2.7 - Representação do desgaste de flanco não uniforme e sua vista de corte (ISO-8688-1, 1989)

O desgaste de flanco localizado que se traduz por uma forma de desgaste exagerado em pontos localizados nos flancos (Figura 2.8).

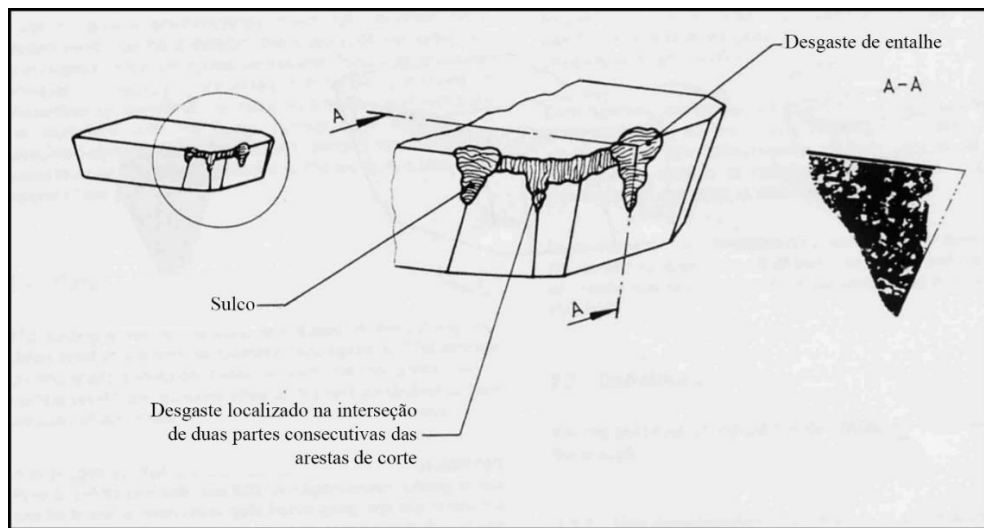


Figura 2.8 - Representação do desgaste de flanco localizado e sua vista de corte (ISO-8688-1, 1989)

Por outro lado, quanto ao desgaste que ocorre na face de ataque, pode desenvolver-se de duas maneiras diferentes que são o desgaste em forma de cratera e o desgaste em forma de escada.

O desgaste em forma de cratera (Figura 2.9), que consiste no desenvolvimento progressivo de uma cratera, com uma orientação aproximadamente paralela à maioria da aresta de corte, onde a sua profundidade máxima, se encontra a uma determinada distância, afastada da aresta de corte.

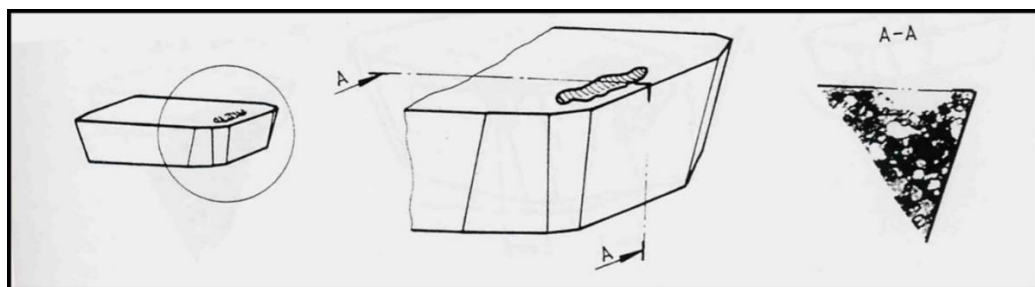


Figura 2.9 - Representação do desgaste em forma de cratera e sua vista de corte (ISO-8688-1, 1989)

O desgaste em forma de escada (Figura 2.10) é uma forma de desgaste que apresenta uma profundidade máxima, medida perpendicular à face de ataque da ferramenta, na interseção da marca de desgaste da face de saída com a aresta de corte principal.

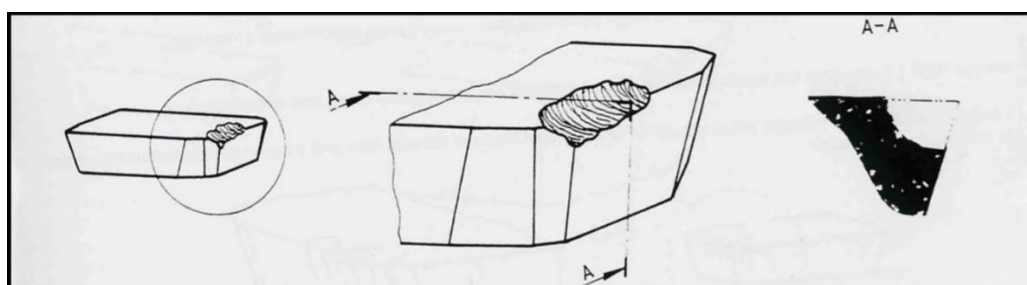


Figura 2.10 - Representação do desgaste em forma de escada e sua vista de corte (ISO-8688-1, 1989)

Os critérios para determinar o fim de vida útil de ferramentas de acordo com a norma (ISO-8688-1, 1989), encontram-se na Figura 2.11 e na Figura 2.12.

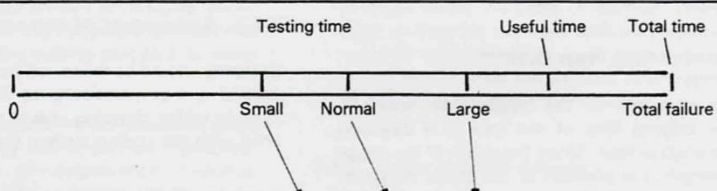

Code	Description of tool deterioration				
Basic form Distribution Subdivision					
	Tool deterioration phenomena	Criteria, mm			Illustration
		S	N	L	
VB	Flank wear				
1	Uniform	0,2	0,35	0,5	
2	Non-uniform	0,9	1,2	1,5	
3	Localized	0,8	1	1,2	

Figura 2.11 - Critérios para determinar o fim de vida útil da ferramenta quando sujeita a desgaste de flanco (ISO-8688-1, 1989)

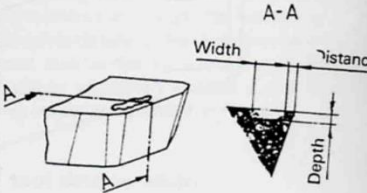
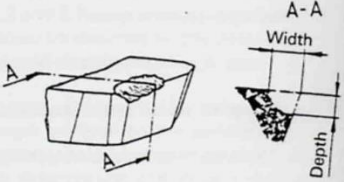
KT	Face wear						
1	Crater wear :	Depth	0,05	0,1	0,15		
		Width*		
		Distance*		
2	Stair forms :	Depth	0,25	0,3	0,35		
		Depth/width*		

Figura 2.12 - Critérios para determinar o fim de vida útil da ferramenta quando sujeita a desgaste da face de ataque (ISO-8688-1, 1989)

O desgaste de cratera e o desgaste de flanco aumentam de forma progressiva com o decorrer do tempo de corte. Enquanto que o desgaste de cratera apresenta uma evolução linear o desgaste de flanco apresenta uma evolução não linear, podendo esta ser representada por uma curva padrão (Amaro, 2017), a qual se encontra representada na Figura 2.13.

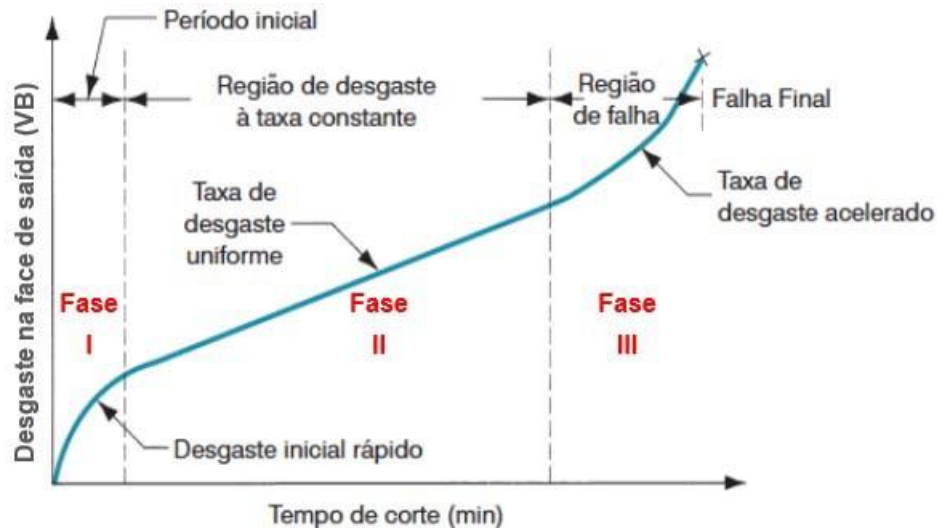


Figura 2.13 - Evolução do desgaste na face de saída (VB) em função do tempo de corte

2.5 Estudo da Vibração

O fenómeno de vibração é uma manifestação do comportamento oscilatório em sistemas mecânicos, resultando em repetidas variações de energia cinética e potencial entre os componentes do sistema. Estas variações de energia que provocam uma resposta oscilatória não se resumem apenas a sistemas mecânicos, mas, também estão presentes em sistemas elétricos e de fluídos. O registo da vibração é geralmente traduzido graficamente por uma onda representada em função da sua amplitude e do tempo, tal como está representado na Figura 2.14.

2.5.1 Parâmetros das Vibrações

Em primeiro lugar é necessário rever alguns conceitos fundamentais para a compreensão do tema em estudo e sua análise:

- Pico:** O valor do pico indica o nível máximo pontual, não tendo em conta a evolução temporal da onda;
- Pico-a-pico:** O valor de pico-a-pico indica a extensão máxima da onda, uma quantidade útil onde, por exemplo, o deslocamento vibratório de uma parte mecânica é fundamental para a tensão máxima ou o apuramento de considerações mecânicas;
- Fase:** A posição inicial do ponto, no instante ($t=0$) em que se começou a medir, é conhecida por Fase e é indicada em radianos ou em graus;
- Período:** O período representa o intervalo de tempo correspondente a uma oscilação completa da onda;
- Comprimento de onda:** é a distancia entre dois picos sucessivos (Mendes, 2016).

Geralmente, em regime de funcionamento, um equipamento está sujeito a vibrações que ocorrem nas mais diversas frequências. Como todos estes sinais acontecem ao mesmo tempo, torna-se muito difícil avaliá-los no tempo, pois têm diversas frequências e amplitudes sobrepostas.

Analisando a seguinte figura constata-se que estão representados três sinais que surgem simultaneamente no tempo. Observa-se que no mesmo intervalo de tempo, o primeiro sinal repete-se três vezes, o segundo seis vezes e o terceiro nove. Se analisarmos os períodos verifica-se que o período da primeira onda corresponde a dois períodos na onda segunda e a três períodos na terceira onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014).

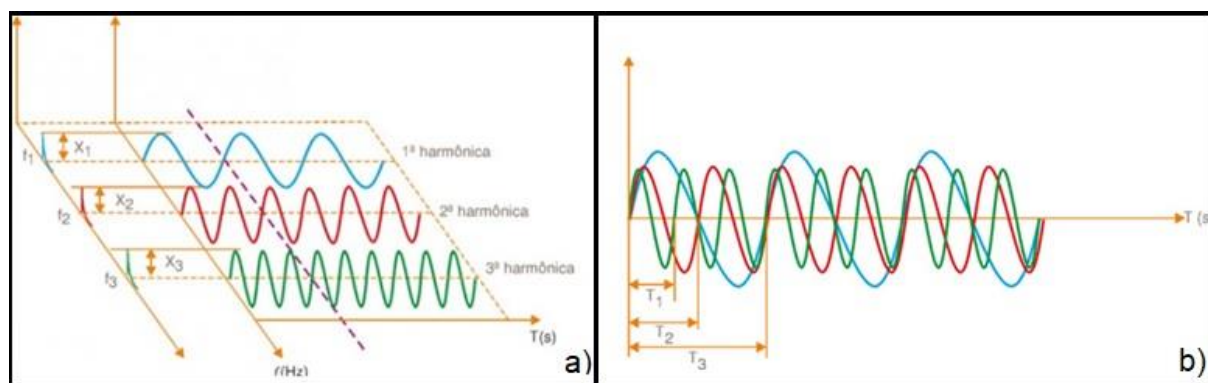


Figura 2. 14 - a) Decomposição dos harmónicos de uma onda; b) Junção dos harmónicos de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014)

Pode-se desta forma concluir que estes três sinais são harmónicos entre si, sendo que o segundo e terceiro ocorrem em frequências múltiplas do primeiro. Se representássemos estes três sinais decompostos num sistema cartesiano eles estariam sobrepostos.

2.5.1.1 RMS

Um conceito importante, representado na Figura 2.15, é o RMS (“Root Mean Square”), ou seja, o valor médio quadrático ou valor eficaz de uma função periódica. É a medida de nível mais relevante, porque leva em consideração o histórico no tempo da onda e dá um valor que está diretamente relacionado à energia contida, e portanto, à capacidade destrutiva da vibração (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014).

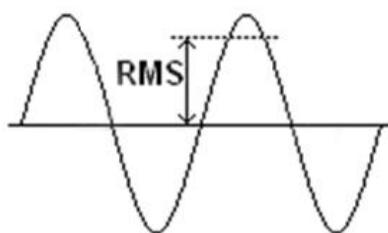


Figura 2.15 - Representação gráfica do valor de RMS de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014)

2.5.1.2 FFT

Para simplificar o processo de decomposição, os programas de análise de vibração utilizam a Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform). Um gráfico FFT não é nada mais do que uma transformação de dados do domínio do tempo (amplitude em função do tempo) em dados de domínio de frequência (amplitude em função da frequência). Na Figura 2.16 representa-se de forma esquemática essa transformação de domínios, podendo-se desta forma verificar qual o espectro de frequência mais relevante na análise global de vibração (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014).

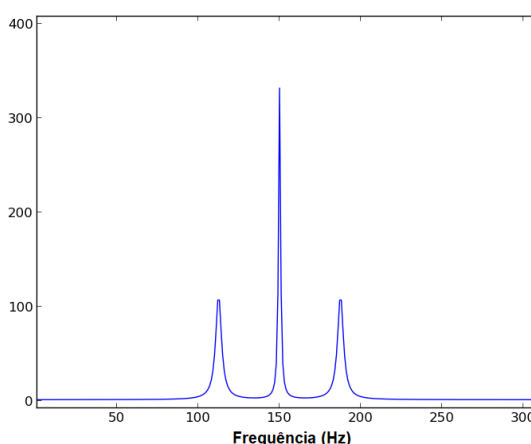


Figura 2.16 - Representação gráfica de um sinal em FFT (OBS, 2017)

No entanto, durante a conversão do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, ocorre o efeito de vazamento espectral (efeito conhecido como leakage) que corresponde a um fenómeno que tende a espalhar a energia contida numa frequência em linhas adjacentes no espectro, distorcendo-o e fazendo com que a amplitude seja subestimada. Para minimizar este efeito, os sinais devem ser multiplicados por uma função matemática que faz com que o sinal tenha valor igual a zero no início e no final do registo temporal. Esta função é chamada de função janela e são diversas as expressões que podem ser usadas, contudo a que se utiliza neste projeto é a função janela designada por Hanning (Mendes, 2016).

2.5.1.3 Oitavas

A análise FFT pode em certos sinais fornecer mais informação do sinal do que o necessário. Quando isso acontece a análise de oitavas é a melhor opção, uma vez esta análise apresenta as características de frequência de um sinal em faixas de frequência. Análise de oitavas é como a passagem de um sinal através de uma série de filtros de banda, cada um cobrindo uma oitava, como representado na Figura 2.17 (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014).

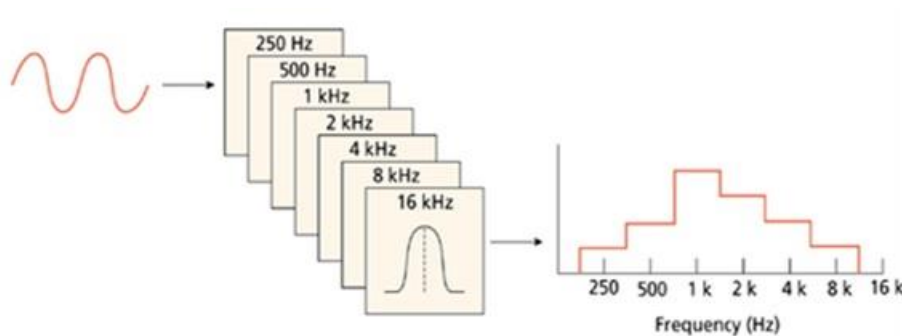


Figura 2.17 - Exemplo da conversão de um sinal para análise de oitavas (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014)

Repartindo as frequências em oitavas ajuda a medir as qualidades subjetivas da vibração, permite mostrar resultados ao longo de múltiplas oitavas, sendo possível desta forma comparar os níveis de sinal sobre uma ampla faixa de frequência.

Os filtros de banda de oitava podem ser filtros analógicos (passivos ou ativos, que operam com sinais de tempo contínuo) ou filtros digitais (que operam em sinais em tempo discreto). Analisadores tradicionais de oitavas normalmente utilizam filtros analógicos, contudo analisadores de oitavas baseados em computadores na maioria das vezes usam filtros digitais.

Quanto menor a percentagem, maior a resolução do espectro, mas também será maior o tempo necessário para a aquisição de dados. (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014)

Na Figura 2.18 apresenta-se o mesmo sinal, mas analisando em oitavas e analisando em 1/3 de oitavas.

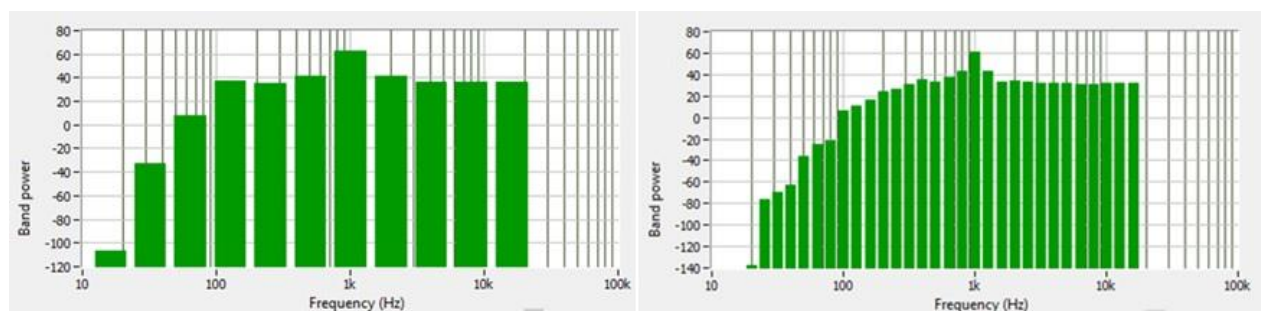


Figura 2.18 - Gráfico de uma análise em oitavas (esquerda) e 1/3 de oitavas (direita) (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014)

2.5.2 Teorema da Amostragem

O teorema da amostragem de Nyquist diz-nos que:

“Se um sinal periódico que varia com o tempo, for obtido com a uma taxa de aquisição de pelo menos duas vezes superior à da frequência máxima do fenómeno, este pode ser exatamente reproduzido através das amostras”. Esta condição pode ser expressa por:

$$F_a \geq 2 * F_c$$

(Equação 2.1)

Fa – Frequência de amostragem

Fc – Frequência máxima do fenómeno a registar o sinal

Este teorema apresenta uma grande utilidade, mas apesar de ser possível reconstruir o gráfico original através da lista de pontos, reconstruir exatamente o gráfico original através das amostras obtidas requer um número mínimo de amostras. O fator chave para uma exata recriação do gráfico original é a distância entre amostras, tendo em conta o valor máximo de acordo o tempo. (Hecht, 2017)

2.5.3 Análise Gráfica no Domínio do Tempo e Frequência

A análise de um sistema de vibração pode ser feita no domínio do tempo ou no domínio da frequência. No domínio do tempo, a variável independente do sinal de vibração é o tempo, neste caso, o próprio sistema pode ser modelado por um conjunto de equações de acordo com o tempo. No domínio da frequência, a variável independente do sinal de vibração é a frequência. Neste caso, o sistema pode ser modelado através de funções de transferência. Na prática são utilizados componentes eletrónicos e computadores, na análise de sinal, onde são aplicados tempo, dados da amostra e o sinal digital no domínio do tempo. Correspondentemente são utilizadas transformadas de Fourier ou FFT no domínio da frequência.

A representação do domínio do tempo dá a amplitude do sinal no instante de tempo que foi escolhido pelo utilizador. Entretanto, em muitos casos, existe a necessidade de saber o conteúdo da frequência de um sinal, em vez de um único valor da amplitude.

Como foi dito anteriormente, a transformada rápida de Fourier (FFT) fornece um método para analisar o domínio da frequência. O teorema de Fourier estabelece que qualquer forma de onda no domínio do tempo pode ser representada pela soma ponderada de senos e cossenos. A forma de onda pode então ser representada no domínio da frequência como um par de valores de amplitude e fase de cada componente da frequência (National Instruments, 2017).

No domínio da frequência, pode-se separar conceitualmente as sinusoides que formam o sinal. A Figura 2.19 mostra componentes simples da frequência espalhados no domínio do tempo, como impulsos distintos no domínio da frequência.

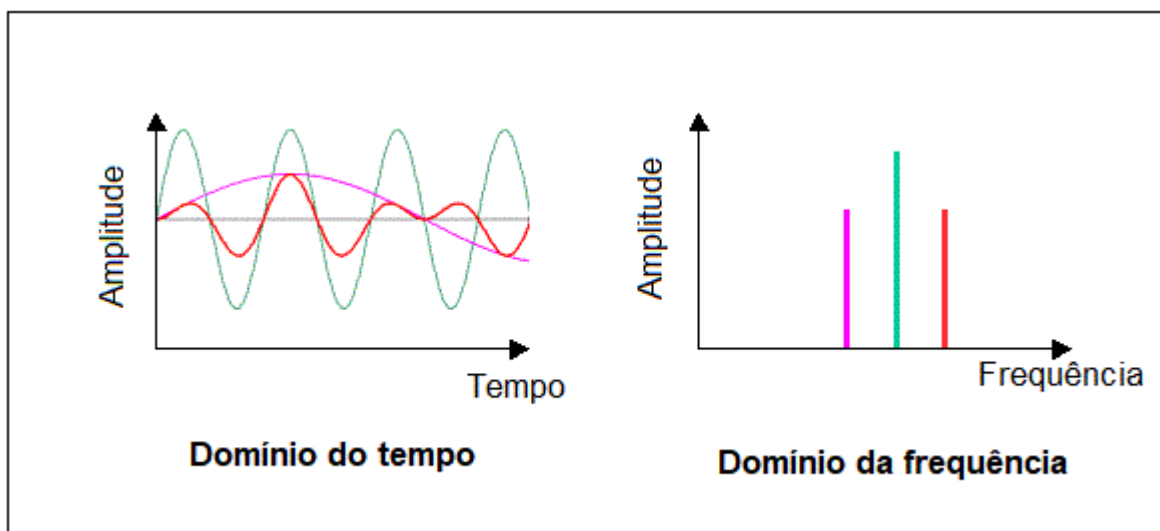


Figura 2.19 - Passagem de um sinal no domínio do tempo para o domínio de frequência (National Instruments, 2017)

A amplitude de cada frequência é a mesma amplitude da forma de onda em função do tempo para cada componente da frequência. A representação do sinal em termos dos seus componentes individuais é a representação do domínio da frequência do sinal. A representação do domínio da frequência fornece mais detalhes sobre o sinal e o sistema a partir do qual ela foi gerada.

As amostras de um sinal obtidas a partir de um dispositivo de aquisição de dados constituem a representação no domínio do tempo do sinal. Algumas medições, como ruídos ou distorção harmônica são difíceis de quantificar apenas inspecionando a forma de onda do tempo. Quando o mesmo sinal é mostrado no domínio da frequência por uma FFT, consegue-se facilmente medir as frequências harmônicas e as amplitudes. Se estiver presente um ruído no sinal, este pode ser movido do domínio do tempo para o domínio da frequência para isolar a perturbação na sua medição (National Instruments, 2017).

Capítulo 3

Trabalho Experimental de Avaliação do Desgaste e de Aquisição do Sinal de Vibração

3.1 Enquadramento da Componente Experimental

Durante o procedimento experimental, foram realizados ensaios que consistiram em facejar um bloco retangular de aço inoxidável duplex, e obter durante o corte o sinal de vibração proveniente da árvore do centro de maquinagem (Figura 3.1).

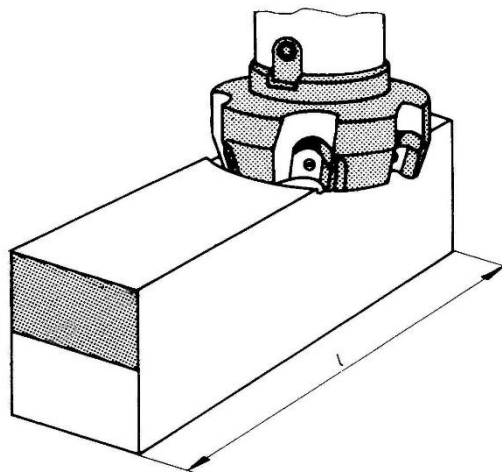


Figura 3.1 - Representação do processo de facejamento do bloco, a ser realizado nos ensaios experimentais (ISO 8688-1)

Para a realização deste trabalho começou-se por fixar convenientemente o bloco de aço inoxidável duplex à mesa do centro de maquinagem, tal como mostra na Figura 3.2, utilizando-se para o efeito quatro grampos de fixação com os respectivos tirantes para ranhuras em T e porcas de aperto.

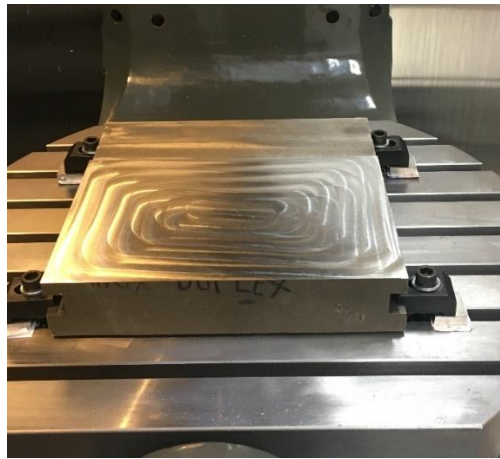


Figura 3.2 - Fixação do bloco de aço inoxidável duplex

De seguida procedeu-se à determinação do zero-peça, com sonda de transmissão de sinal ótico (Renishaw® OMP40-2). Posteriormente mediu-se o comprimento da ferramenta, através do apalpador elétrico de contacto (Renishaw® OTS), para determinar a compensação de altura (tool offset), tal como foi feito no trabalho anterior desenvolvido com o mesmo material (Amaro, 2017).

3.2 Condições Experimentais Implementadas

3.2.1 Centro de Maquinagem

Os ensaios foram realizados num centro de maquinagem de cinco eixos, Haas UMC-750 SS, onde se adquiriram os sinais provenientes das vibrações da árvore de rotação da fresadora (Figura 3.3).



Figura 3.3 - Centro de maquinagem HAAS UMC 750SS

3.2.2 Material maquinado nos ensaios

O material utilizado para os ensaios foi o aço inox duplex GX6CrNiN26-7 (1.4347), de acordo com a norma DIN EN 10283, produzido pela empresa ARSOPI®, com a composição química e propriedades mecânicas indicadas na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2 respectivamente. Este aço inoxidável apresenta, à temperatura ambiente, uma estrutura bifásica constituída por austenite e ferrite.

Tabela 3.1 - Composição química dos aços inoxidáveis (utilizado a vermelho) (BSSA, 2017)

Designation		Chemical composition % by mass (max unless otherwise stated)												
Steel name	Steel number	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Cu	Nb ¹⁾	W	V
Austenitic-ferritic grades														
GX6CrNiN26-7	1.4347	0.08	1.50	1.50	0.035	0.020	25.00/27.00	-	5.50/7.50	0.10/0.20	0.50	-	-	-
GX2CrNiMoN22-5-3	1.4470	0.030	1.00	2.00	0.035	0.025	21.00/23.00	2.50/3.50	4.50/6.50	0.12/0.20	0.50	-	-	-
GX2CrNiMoN25-6-3	1.4468	0.030	1.00	2.00	0.035	0.025	24.50/26.50	2.50/3.50	5.50/7.00	0.12/0.25	0.50	-	-	-
GX2CrNiMoCuN25-6-3-3	1.4517	0.030	1.00	1.50	0.035	0.025	24.50/26.50	2.50/3.50	5.00/7.00	0.12/0.22	2.75/3.50	-	-	-
GX2CrNiMoN25-7-3	1.4417	0.030	1.00	1.50	0.030	0.020	24.00/26.00	3.00/4.00	6.00/8.50	0.15/0.25	1.00	-	1.00	-
GX2CrNiMoN26-7-4	1.4469	0.030	1.00	1.00	0.035	0.025	25.00/27.00	3.00/5.00	6.00/8.00	0.12/0.22	1.30	-	-	-

O bloco de material apresentava inicialmente as dimensões de 300 X 300 X 70 mm (comprimento X largura X altura), com quatro sulcos laterais para fixação, de acordo com a Figura 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável duplex utilizado nos ensaios

Propriedades mecânicas	
Resistência à tração [MPa]	590
Tensão de cedência [MPa]	420
Alongamento [%]	20
Resistência ao impacto [J] 30	30

3.2.3 Caracterização da Ferramenta de Corte

A ferramenta e as pastilhas de corte utilizadas nos ensaios (Figura 3.4) foram as mesmas que foram utilizadas num trabalho desenvolvido anteriormente no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (Amaro, 2017).

Na fresa de topo plano são montadas 3 pastilhas de carboneto de tungsténio sinterizado, classificados pelo sistema de codificação de graus da Palbit® por PH7930, revestida com AlTiN, pelo método de PVD. Estas pastilhas possuem elevada dureza e resistência ao desgaste.

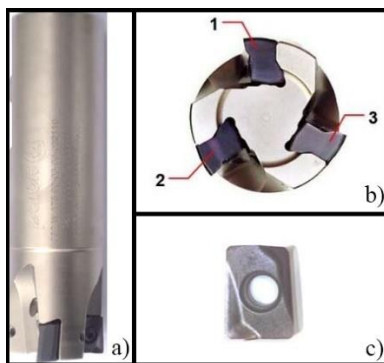


Figura 3.4 - Ferramenta de corte utilizada nos ensaios: a) Vista de frente; b) Vista de topo (3 gumes de corte); c) Pastilha PH 7930 (Amaro, 2017)(Adaptado)

O porta-ferramenta faz a interface entre a máquina e a ferramenta de corte, podendo influenciar significativamente a qualidade superficial das peças e a vida útil da ferramenta. Por isso, é importante escolher o sistema de fixação adequado uma vez que pode existir uma grande concentração de esforços nesta ligação. Os sistemas utilizados para ferramentas com haste cilíndrica, dependendo do tipo de aplicação, podem ser de fixação térmica ou mecânica. Entre os porta-ferramentas com sistema de aperto mecânicos mais comuns temos os hidráulicos, os porta-pinças ER, o *whistle-notch* e o *weldon*.

Durante os ensaios experimentais foi utilizado o porta-ferramentas SK40 com adaptador *weldon*, de acordo com a norma DIN 69871, da marca HAIMER® (Amaro, 2017), conforme é possível observar na figura Figura 3.5.



Figura 3.5 - Porta-ferramentas weldon com pino de fixação CAT 40X45° M16 (Amaro, 2017)

3.2.3 Aquisição de Imagens e Medição do Desgaste

Para monitorizar o desgaste de flanco e o desgaste de entalhe nas pastilhas da ferramenta de corte foi utilizada uma lupa digital “Dino Lite Basic”, sendo a captura de imagem feita através do software de aquisição de imagem “Dino Capture 2.0”, indicado na Figura 3.6.

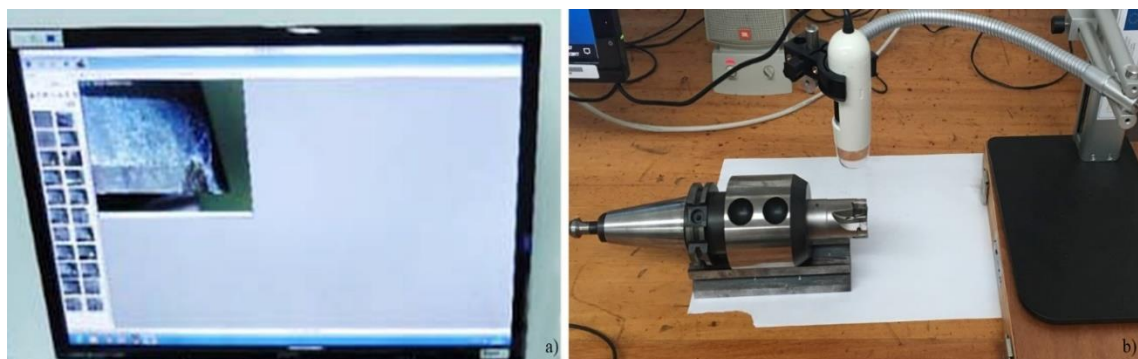


Figura 3.6 - Aquisição de imagem: a) Interface do software Dino Capture 2.0; b) Lupa de aquisição de imagem

Seguidamente, importaram-se as imagens obtidas no software de aquisição, para outro software “Axion Vision LE”, indicado na Figura 3.7 onde foi medido o desgaste de flanco e desgaste do entalhe observado na face de saída principal da pastilha.

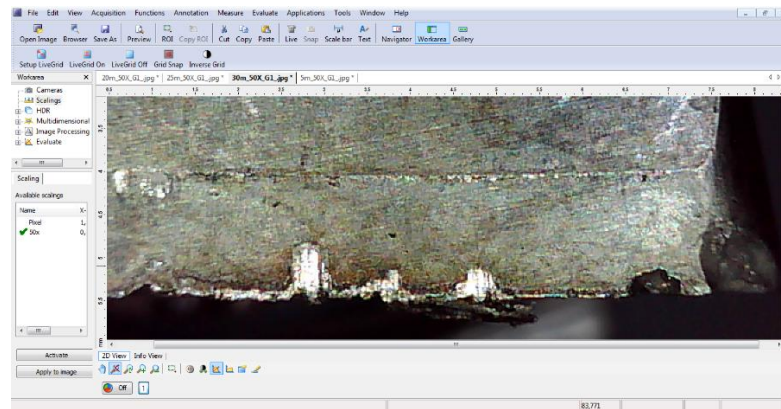


Figura 3.7 - Interface do software Axion Vision LE usado para medir o desgaste das ferramentas

3.2.4 Software CAM e Estratégia de Maquinagem

3.2.4.1 Software de Fabrico Assistido por Computador

O software de fabrico assistido por computador utilizado foi o Mastercam® X9 (Figura 3.8), desenvolvido pela empresa CNC Software, Inc., USA (United States of America). Este software para de maquinaria para 2 a 5 eixos suporta vários tipos de máquinas, e vários tipos de funcionalidades. Apresenta um conjunto abrangente de trajetórias de ferramentas predefinidos do Mastercam, tais como “contour”, “drill”, “pocket”, “face”, “peel mil”, “engraving”, “surface high speed”, “advanced multiaxis”, entre outros, permitindo ao utilizador maquinar peças com eficiência e precisão. Os utilizadores do Mastercam podem criar e cortar peças usando uma das várias configurações da máquina e do controlador. A utilização deste software deve-se ao facto de ser utilizado, ao longo dos últimos anos, no Departamento de Engenharia Mecânica, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

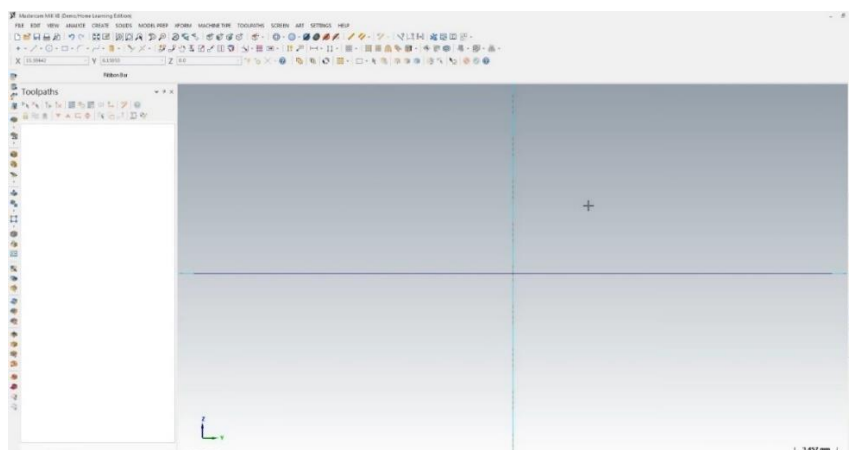


Figura 3.8 - Interface do software de fabrico assistido por computador Mastercam® X9

3.2.4.2 Estratégia Trocoidal

Na fresagem existem várias estratégias para gerar trajetórias de maquinagem entre as quais prevalecem as paralelas a uma direção, ou em zigue-zague, e as equidistantes ao contorno (também conhecidas por pelo termo em inglês offset). Além das soluções anteriores, recentemente os softwares CAD/CAM têm surgido com outras estratégias inovadoras para a geração de trajetórias, entre as quais a trocoidal, a qual será utilizada neste trabalho.

De acordo com o trabalho de (Amaro, 2017), chegou-se à conclusão que esta é a estratégia mais recomendável para a maquinagem de aço inoxidável duplex, tendo em vista aumentar o tempo de vida útil da ferramenta sem comprometer a taxa de remoção de material.

Esta estratégia pode ser definida como sendo a conjugação simultânea de dois movimentos, um deles circular, ou aproximadamente circular e outro de translação no sentido radial (Amaro, 2017), conforme se apresenta na Figura 3.9. A opção trocoidal utilizada do software Mastercam foi a “Peel Mil”, que utiliza ciclos dinâmicos de alta velocidade (2D highs speed toolpath).

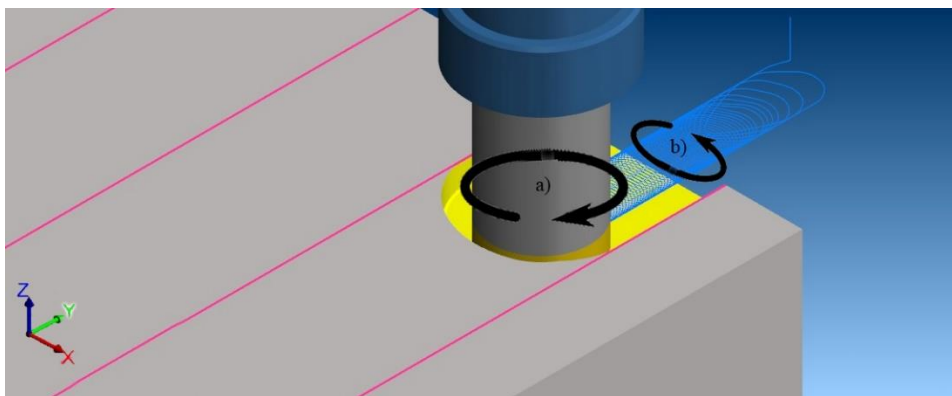


Figura 3.9 - Simulação do ensaio experimental no software Mastercam® X9: a) Sentido de rotação da ferramenta; b) Sentido da trajetória da ferramenta

Desta forma a trajetória é repetida pela ferramenta, que vai removendo porções de material numa sequência ou percurso com a configuração de uma espiral contínua para formar um canal ou um perfil. Assim, a ferramenta roda a uma velocidade constante, mantendo-se sempre em movimento, aproximando-se do bloco de material enquanto percorre uma trajetória de configuração espiral, onde remove uma determinada quantidade de material e, rapidamente se desloca de modo a fazer a próxima trajetória de configuração espiral (MFGTechUpdate, 2017).

Em teoria esta estratégia permite que ocorram sempre mudanças de direção suaves, minimizando o problema nos cantos e nos segmentos com raio de curvatura pequenos. É um excelente método para abertura de canais, quando as vibrações são um problema e é igualmente adequado para a fresagem de cavidades confinadas, no entanto, metade do tempo de maquinagem a ferramenta está fora da zona de corte do bloco de material (Sandvik, 2010); (González, 2013).

Na Figura 3.10 está esquematizado o movimento da ferramenta e os parâmetros inerentes ao movimento trocoidal.

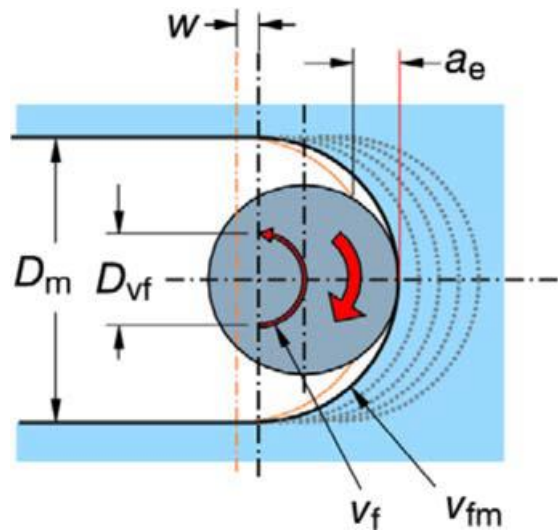


Figura 3.10 – Movimento da ferramenta de corte em fresagem trocoidal (Sandvik, 2010)

O avanço ou passo radial (w) da ferramenta, também designado pelo termo em inglês “step over”, permanece inalterável, no entanto, o arco de contacto e a largura de corte (a_e) variam constantemente atingindo o seu valor máximo na posição da linha de eixo do canal.

Conforme refere a (Sandvik, 2010), a largura de corte máxima (a_e) não deve exceder os 20% do diâmetro da fresa. Para larguras de canais (D_m) inferiores a duas vezes o diâmetro máximo da fresa (D_c), a largura de corte máxima é maior que o passo programado, tal como na Figura 3.10. Nesta situação é importante definir o passo radial abaixo de 10% de D_c de modo a garantir que o a_e máximo não ultrapasse os 20% de D_c . A limitação do arco de contacto consegue-se através da diminuição do diâmetro da fresa, que deve ser pelo menos 30% abaixo da largura do canal para que possa efetuar a trajetória circular.

Nesta estratégia, a entrada e saída da ferramenta é programada com uma interpolação circular, com passos radiais (w) pequenos, o que significa que o arco de contato gera baixas forças de corte permitindo aumentar a profundidade de corte (a_p) até $2 \times D_c$. Como todo o comprimento da aresta de corte é utilizado, garante-se que o calor e o desgaste sejam distribuídos uniformemente, proporcionando uma vida útil da ferramenta mais longa que na fresagem tradicional, conforme é possível comparar na Figura 3.11.



Figura 3.11 - Profundidade de corte (a_p) e largura de corte (a_e) na fresagem tradicional e na fresagem trocoidal (Mastercam, 2015)

Devido ao arco de contato pequeno são utilizadas normalmente ferramentas com múltiplas arestas de corte, o que permite elevadas velocidades de avanço assegurando a vida útil da ferramenta.

A fresagem trocoidal tem uma perspectiva muito promissora uma vez que o reduzido tempo de contacto, entre a aresta de corte e o material, implica uma menor quantidade de calor transferido beneficiando a vida útil da ferramenta, a produtividade e a tolerância das peças (Sandvik, 2010); (Amaro, 2017).

De forma sintetizada as vantagens desta estratégia são as seguintes:

- Redução significativa dos custos de produção devido a altas velocidades de processamento;
- Baixas forças de corte, devido a cortes transversais;
- Redução dos tempos de processamento;
- Aumento da vida útil da ferramenta;
- Excelente qualidade das superfícies obtidas, devido às entradas e saídas suaves realizadas na trajetória da ferramenta;
- Permite usar maiores profundidades de corte;
- Menores esforços exercidos no centro de maquinagem (MFGTechUpdate, 2017).

3.2.5 Parâmetros de Corte

Na fresagem, assim como em outros processos tecnológicos de maquinagem, os parâmetros de corte bem definidos têm uma enorme importância para se maximizar os resultados relativamente a tempos de operação, ao período de vida útil da ferramenta e à qualidade superficial das peças.

Os parâmetros de corte responsáveis pelo movimento da ferramenta são a velocidade de rotação (n) e a velocidade de avanço (V_f). A velocidade de rotação, calculada pela (Equação 3.1) a partir do valor da velocidade de corte (V_c) e do diâmetro de corte (D_{cap}), indica o número de rotações que a ferramenta faz por minuto.

$$n = \frac{1000 * V_c}{\pi * D_{cap}}$$

(Equação 3.1)

A velocidade de avanço (expressa em mm/min) caracteriza o movimento da ferramenta em relação à peça, calculada pela (Equação 3.2), depende do avanço por dente (f_z) e do número de dentes da fresa (Z_n), onde:

$$V_f = f_z * n * Z_n$$

(Equação 3.2)

D_{cap} – Diâmetro de corte na profundidade de corte efetiva, ap [mm];

f_z – Avanço por dente [mm];

n – Velocidade de rotação [rpm];

V_c – Velocidade de corte [m/min];

V_f – Velocidade de avanço [mm/min];

Z_n – Número total de dentes. (Sandvik, 2017)

Nos ensaios realizados manteve-se constante o tipo de trajetória da ferramenta, a profundidade de corte e a largura de corte. Os parâmetros de corte em que foram utilizados diferentes valores nos ensaios, encontram-se indicados na Tabela 3.3 pelo intervalo de variação.

Tabela 3.3 - Condições experimentais estabelecidas para os parâmetros de corte

Parâmetros de corte	
Velocidade de corte – V_c [m/min]	100-240
Avanço por dente – f_z [mm/t]	0.15-0.20
Largura de Corte – D_{cap} [%]; [mm]	7; 2.24
Tempo de Maquinagem - [min]	5-30
Profundidade de corte – a_p [mm]	7.5

3.2.6 Implementação do Sistema de Aquisição do Sinal de Vibração

Para proceder à aquisição do sinal de vibração induzido pelo centro de maquinagem de cinco eixos HAAS UMC 750 SS, durante a maquinagem do aço inoxidável duplex, foi necessário o seguinte equipamento:

- Um acelerómetro;
- Uma placa de aquisição de dados;
- Um computador com um software de dados.

3.2.6.1 Software Utilizado

O software utilizado foi o LabView (National Instruments, 2015), no qual se utilizou um programa criado anteriormente por alunos da unidade curricular de Projeto da Licenciatura em Engenharia Mecânica (Ribeiro, Pinto, & Barros, 2014) e que posteriormente foi adaptado, de modo a ser possível obter o sinal de vibração induzido pela árvore de rotação da fresadora, através de um acelerómetro triaxial, por um aluno de mestrado em Engenharia Mecânica (Mendes, 2016). Posteriormente, tendo em vista a realização dos testes, foi feita uma otimização do programa de modo a ser possível filtrar a informação obtida. Na Figura 3.12 encontra-se o layout da aplicação utilizada para os ensaios realizados.



Figura 3.12- Layout do menu principal do programa criado no Software Laviw® da National Instruments (Mendes, 2016)

3.2.6.2 Acelerómetro e Placa de Aquisição

O acelerómetro utilizado para aquisição do sinal de vibração está representado na Figura 3.13, sendo este um acelerómetro triaxial piezoelétrico, do fabricante PCB Piezotronics (PCB, 2017).

O acelerómetro apresenta um sistema de eixos, conforme apresentado na Figura 3.16, cuja orientação, por questões de interpretação simplificada, idealmente deve ser a mesma dos 3 eixos de translação do centro de maquinagem. No entanto, neste trabalho, durante a aquisição do sinal de vibração, a orientação do sistema de eixos do acelerómetro e do centro de maquinagem foram diferentes, por questões práticas de montagem do equipamento. As suas principais características são as seguintes:

- Modelo: 356B08;
- Sensibilidade: 100.6mV/g (10.26 mV/(m/s²)) 100 Hz a 22 °C;
- Sensibilidade transversal: 1.0%;
- Faixa de temperatura de operação: -54 °C até 121 °C;
- Alimentação: 10.9 V DC;



Figura 3.13 - Acelerómetro da marca PCB modelo 356B08 (GlobalSpec, 2017)

A montagem do acelerómetro deve ser realizada escolhendo o método mais adequado, tendo em conta as vantagens e desvantagens, de acordo com as características, tais como o local onde

se quer montar o acelerômetro, rugosidade da superfície, temperatura e a gama de frequências que o acelerômetro vai adquirir durante a sua utilização.

Nesta situação foi utilizada a estratégia da “montagem adesiva” (Figura 3.14), que é utilizada em situações temporárias ou de teste, onde geralmente são utilizadas colas ou ceras para fixar o acelerômetro. Neste método são utilizadas duas técnicas de montagem, onde a colagem do acelerômetro é efetuada diretamente na estrutura teste ou o acelerômetro é colado numa base de montagem ligada à estrutura de teste (PCB, 2017).

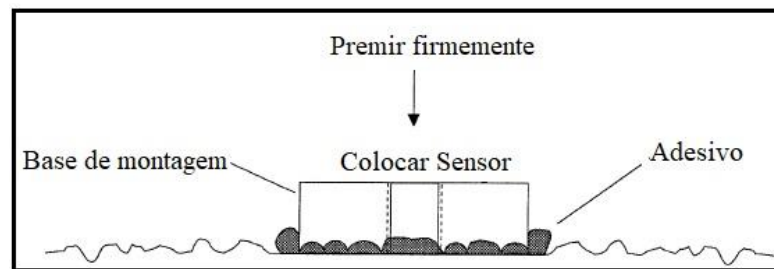


Figura 3.14 - Esquema da estratégia de montagem adesiva

De modo a fixar o acelerômetro na árvore da fresadora foi necessário maquinar uma peça, com o objetivo de não se colar o acelerômetro diretamente na árvore da fresadora. A peça maquinada foi uma placa de alumínio de pequena espessura, para que a mesma absorva o mínimo possível das vibrações transmitidas pela árvore. Foi maquinada uma peça com uma curvatura correspondente ao raio de curvatura da árvore, tal como na Figura 3.15.

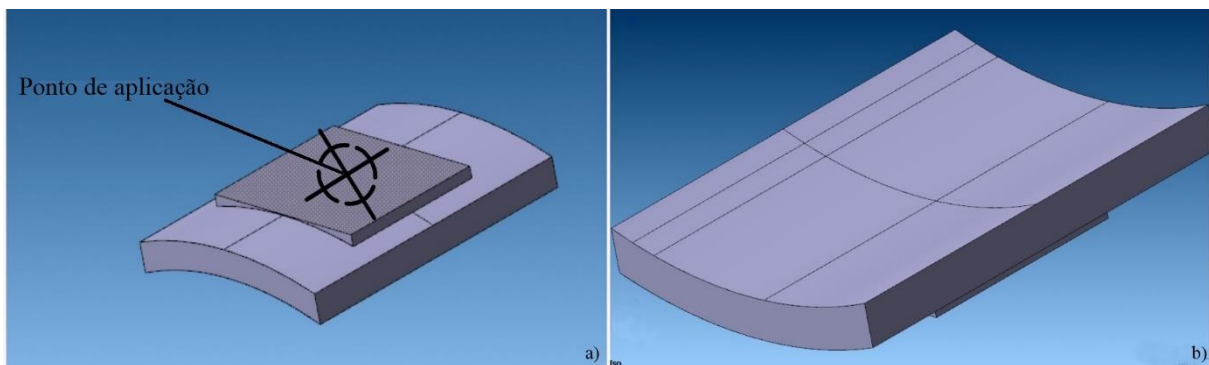


Figura 3.15 - Representação da peça maquinada, utilizada, para fixar o acelerômetro à árvore da fresadora: a) Ponto de aplicação; b) Face que coincide com a superfície da árvore da fresadora

A base de montagem do acelerômetro que foi ligado à árvore com uma fita-cola de dupla face e com duas braçadeiras plásticas, de acordo com a Figura 3.16. Como foi referido anteriormente, o sistema de eixos utilizado nos teste não correspondeu à orientação do acelerômetro, de modo a não danificar o acelerômetro nas rotinas que são necessárias efetuar, sempre que se liga o centro de maquinagem.

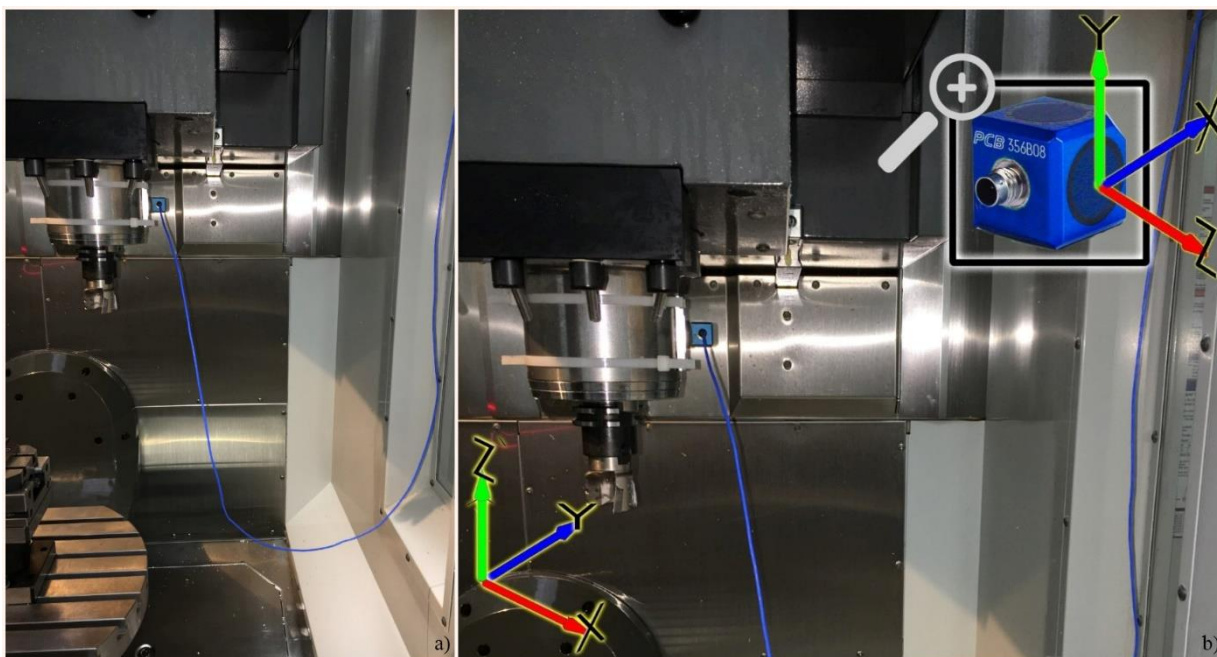


Figura 3.16 - a) Montagem do acelerómetro no centro de maquinagem; b) Orientação dos eixos do centro de maquinagem e do acelerómetro

Para adquirir o sinal de vibração é necessário ligar o acelerómetro a uma placa de aquisição (Figura 3.17), a qual estabelece ligação entre o acelerómetro e o software de aquisição no computador. Foi utilizada uma placa de aquisição do fabricante NI (“National Instruments”), sendo as suas principais características as seguintes:

- Modelo: NI 9234;
- Entradas: 4 analógicas;
- Resolução: 24 bits, faixa dinâmica de 102 db;
- Taxa máxima de amostragem: 51,2 kS/s/canal;
- Voltagem: +/- 5 V.

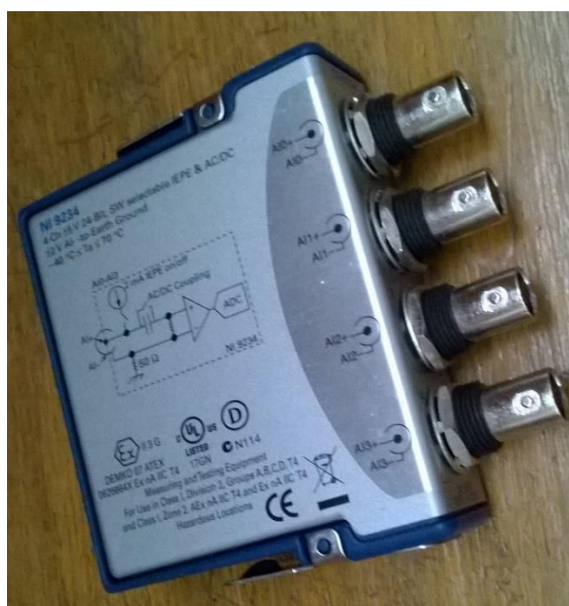


Figura 3.17 - Placa de aquisição de dados NI USB 9234

A seguinte equação fornece as taxas de aquisição disponíveis da placa de aquisição NI 9234:

$$F_s = \frac{51200}{n}$$

(Equação 3.3)

Onde:

- F_s - Taxa de aquisição [Hz]
- n - Número inteiro entre 1 e 31;

Considerando o caso em que a ferramenta é programada para executar 3000 rotações por minuto, a taxa de aquisição do fenómeno, de acordo com o teorema da amostragem é:

$$F_s = \frac{3000}{60} * 2 = 100\text{Hz}$$

No entanto, a taxa de aquisição possível mais próxima do fenómeno é de 1652 Hz ($n=31$), a qual foi utilizada na realização dos ensaios, tal como mostra a Figura 3.18, sendo esta bastante superior à taxa de aquisição necessária.

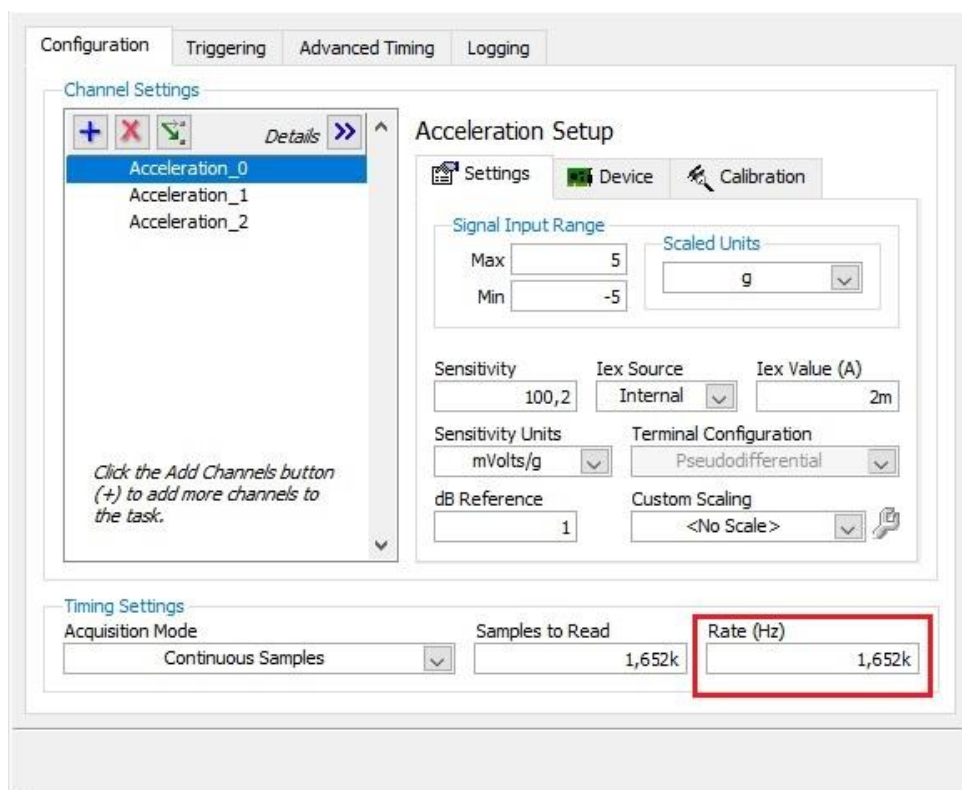


Figura 3.18 - Taxa de aquisição utilizada nos ensaios (Hz)

3.3 Estudo do Desgaste da Ferramenta

3.3.1 Ensaios Realizados

A montagem experimental para avaliar o desgaste da ferramenta e a aquisição do sinal de vibração encontra-se representado na Figura 3.19. Na mesa do centro de maquinagem foi fixo o bloco retangular de aço inox duplex (Figura 3.2), sendo utilizada uma fresa de 3 gumes de corte com pastilhas PH7930 (Figura 3.4). O equipamento foi instrumentado para aquisição do sinal de vibração. Para tal, o acelerómetro foi fixo à árvore, utilizando para o efeito um componente de alumínio cuja geometria permite o acoplamento do acelerómetro árvore (Figura 3.15). Durante as operações de maquinagem com a estratégia trocoidal, o sinal de vibração adquirido na árvore é transmitido por cabo para a placa de aquisição (Figura 3.17), o qual é interpretado no programa criado em Labview® (Figura 3.12). Conforme está apresentada na Figura 3.20, este programa permite observar em tempo real a seguinte informação:

- Valor de RMS para cada eixo do acelerómetro;
- Valor de FFT para cada eixo do acelerómetro;
- Valor de oitavas para cada eixo do acelerómetro;
- Fator de Crista;
- Pico.

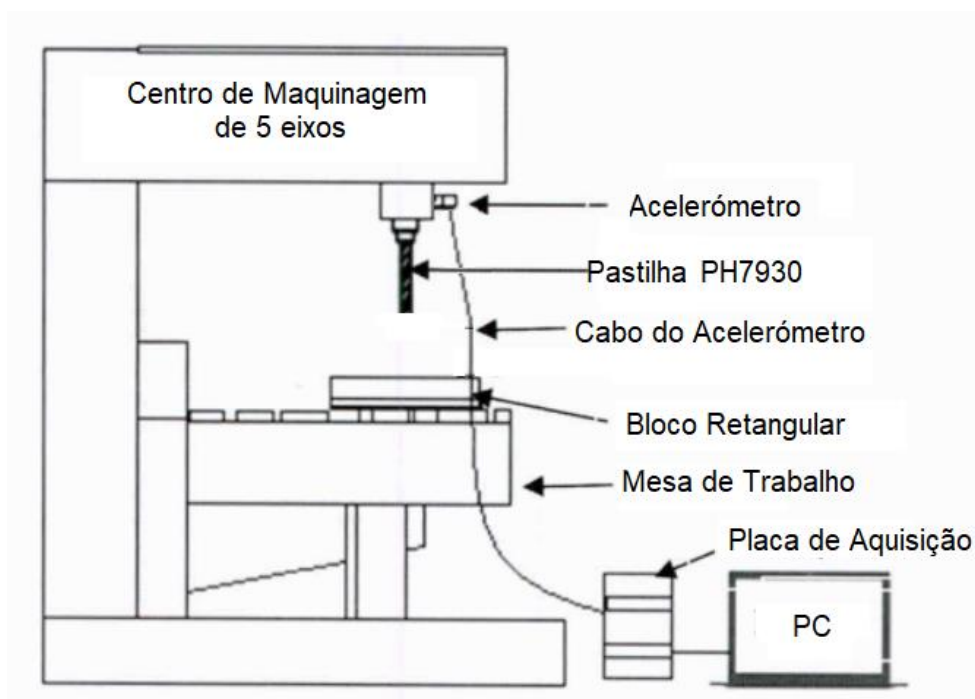


Figura 3.19 - Representação esquemática do procedimento experimental

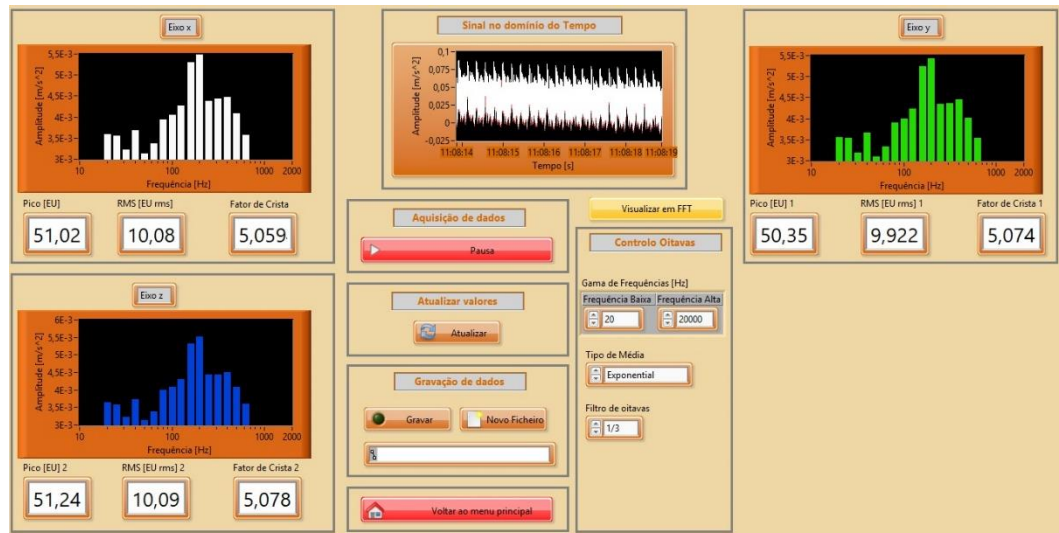


Figura 3.20 - Layout do programa criado no Software LabView®, utilizado durante a aquisição do sinal

Tendo em conta a experiência adquirida num trabalho anterior de maquinagem do aço inox duplex com a mesma ferramenta (Amaro, 2017), na realização dos ensaios foram utilizadas velocidades de corte que variaram entre 120 e 240 m/min. e avanço por dente para a ferramenta de 0.15 e 0.20 mm/dente. Na Tabela 3.4 são apresentados os parâmetros utilizados em cada um dos nove ensaios realizados, bem como o tempo de maquinagem, velocidade de rotação e velocidade de avanço da ferramenta que resultam destes parâmetros.

Tabela 3.4 - Parâmetros de corte utilizados em cada ensaio

	Velocidade de corte [m/min]	Avanço por dente [mm/dente]	Tempo de maquinagem [min]	Velocidade de rotação [rpm]	Velocidade de avanço [mm/min]
Ensaio 1	120	0.15	30	1193	536
Ensaio 2	120	0.20	25	1193	715
Ensaio 3	240	0.15	10	2387	1074
Ensaio 4	240	0.20	10	2387	1432
Ensaio 5	180	0.15	15	1790	805
Ensaio 6	100	0.15	20	994	447
Ensaio 7	140	0.15	20	1392	626
Ensaio 8	160	0.15	20	1591	715
Ensaio 9	200	0.15	20	1989	895

Durante o trabalho, a operação de maquinagem foi interrompida temporariamente em períodos de tempo definidos previamente, de modo a retirar a ferramenta, avaliar e registar com o auxílio de uma lupa, a evolução do desgaste da ferramenta (Figura 3.21). Foram realizadas aquisições do sinal de vibração a cada intervalo de 5 minutos, de forma a obter os diferentes valores de aceleração ao longo de cada ensaio.



Figura 3.21 - Observação da aresta de corte observada na face de saída, com indicação do comprimento da aresta utilizada durante o corte

3.3.2 Interpretação dos Resultados Obtidos

Previamente à realização dos ensaios de corte nas condições apresentadas na Tabela 3.4, foi observada a aresta de corte principal da pastilha antes de ser submetida a trabalho (Figura 3.22). Além disso, foi também registado o sinal captado pelo acelerómetro enquanto a ferramenta trabalha em vazio, com diferentes velocidades de rotação, conforme se ilustra na Figura 3.22 o sinal registado.

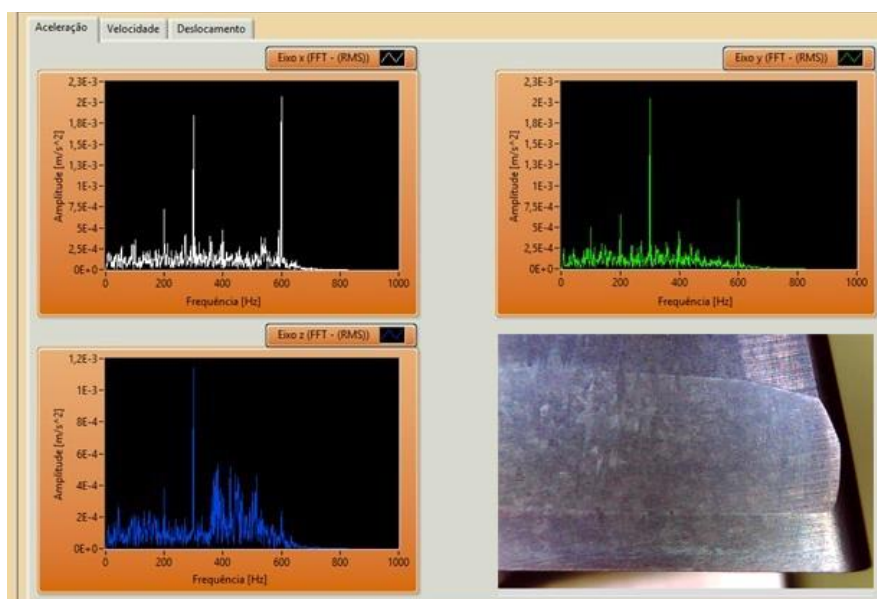


Figura 3.22 - Aresta de corte antes de ser submetida a trabalho e o respetivo sinal de vibração adquirido com a ferramenta a rodar em vazio

À medida que evoluiu o ensaio de corte, para cada um dos gumes de corte da ferramenta, foi registado o valor do desgaste de flanco (VB) e de entalhe (VB_{\max}), conforme se ilustra na figura seguinte e se apresenta detalhadamente nas Tabela 3.5 e Tabela 3.6 para o caso do ensaio 1.

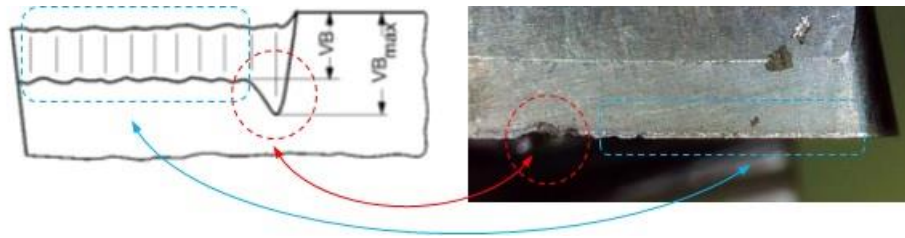


Figura 3.23 - Representação esquemática do desgaste de flanco e de entalhe, e observação dos mesmos na pastilha de corte

Tabela 3.5 - Valores de desgaste de flanco obtidos no ensaio 1

Tempo [min]	Gume 1 [mm]	Gume 2 [mm]	Gume 3 [mm]
5	0,13	0,08	0,12
10	0,17	0,15	0,15
15	0,19	0,19	0,16
20	0,23	0,21	0,20
25	0,25	0,25	0,21
30	0,32	0,31	0,33

Tabela 3.6 - Valores de desgaste de entalhe obtidos no ensaio 1

Tempo [min]	Gume 1 [mm]	Gume 2 [mm]	Gume 3 [mm]
5	0,14	0,21	0,47
10	0,22	0,35	0,51
15	0,33	0,41	0,52
20	0,39	0,49	0,55
25	0,44	0,58	0,57
30	0,71	0,95	0,8

Enquanto o desgaste de flanco é observado desde o início do corte, o desgaste de entalhe surge mais tarde, geralmente está associado a uma rotura localizada do revestimento. Com o continuar

do corte, a zona da aresta de corte sem revestimento encontra-se mais vulnerável, observando-se nesta zona um desgaste mais acentuado do que na restante aresta de corte.

A observação detalhada do gume de corte permite concluir que a par do desgaste gradual da aresta da ferramenta, o qual é quantificado pelo desgaste de flanco, ocorre um fenómeno cíclico de adesão da apara e desprendimento da mesma. A apara aderente permanece colada ao gume de corte até que rompe bruscamente, arrancando consigo pequenas quantidades de material.

A presença de lascamento parcial do flanco com rotura do revestimento, expõe o substrato ao contacto direto com o material a cortar, potenciando a rotura da pastilha, sendo este efeito quantificado pelo desgaste de entalhe.

A Figura 3.24 representa a evolução do desgaste de flanco (VB1) observado na face de saída principal das pastilhas, em função do tempo de maquinagem nos gumes de corte, no ensaio 1, com f_z de 0.15 mm/dente e passo radial com 7% do Dcap (2.24 mm).

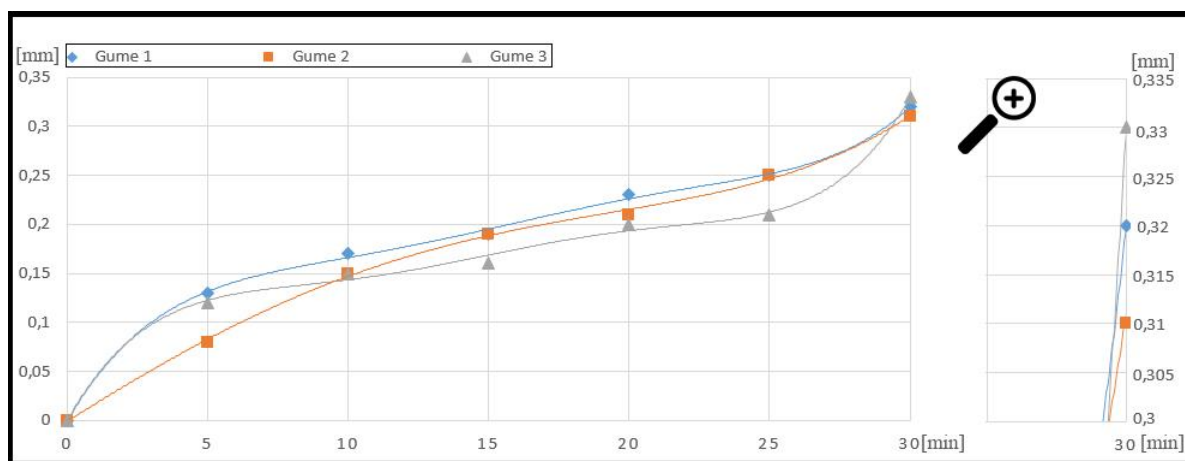


Figura 3.24 - Evolução do desgaste (mm) de flanco (VB1) em função do tempo (min) de maquinagem nos gumes da ferramenta de corte, durante o ensaio 1

Pela análise da Figura 3.24, é possível constatar que os gumes de corte apresentam um comportamento de desgaste aproximado. De acordo com a norma ISO 8688-1, ao fim de 30 minutos de utilização, as pastilhas encontram-se perto do fim da sua vida útil com um desgaste de flanco (VB1) próximo de 0.35mm. Numa primeira fase, no intervalo de tempo [0; 5] min, as pastilhas apresentam um desgaste crescente. Seguidamente, numa segunda fase, no intervalo de tempo [5; 25] min, o desgaste aumenta de forma gradual. Por fim, numa terceira fase, no intervalo de tempo [25; 30], o desgaste aumenta rapidamente num curto espaço de tempo, até atingir o valor limite estipulado na norma.

No que diz respeito ao desgaste de entalhe observado no ensaio 1, a sua evolução está representada na Figura 3.25.

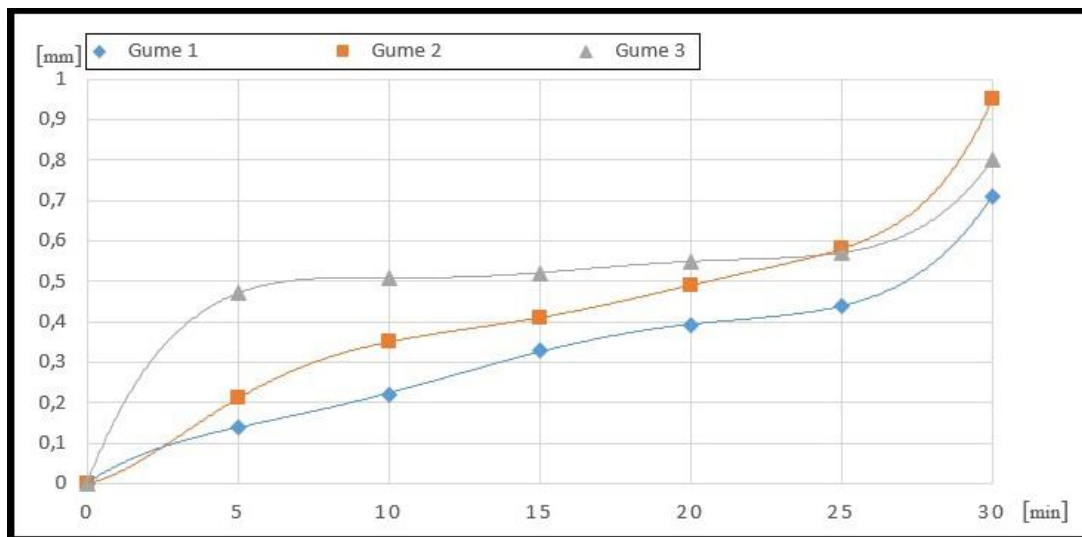


Figura 3.25 - Evolução do desgaste (mm) de entalhe (VB_3) em função do tempo (min) de maquinagem nos gumes da ferramenta de corte, durante o ensaio 1

Ao analisar a *Figura 3.25*, verifica-se que o gume 1 e 2 apresentam um comportamento muito semelhante, enquanto que o gume 3 apresenta um resultado ligeiramente diferente. Tal como no desgaste de flanco, no intervalo de tempo [0; 5] min, as pastilhas apresentam um desgaste crescente. Numa segunda fase, no intervalo de tempo [5; 25] min, o desgaste aumenta de forma gradual ao longo do tempo. Por último, na terceira fase, no intervalo de tempo [25; 30] min, o desgaste aumenta rapidamente num curto espaço de tempo até à rotura da ferramenta. Neste ensaio, após 30 min, de acordo com a norma ISO 8688-1, o gume 2 encontra-se perto do fim da sua vida útil, com um desgaste de entalhe (VB_3) próximo de 1mm.

As pastilhas ensaiadas com um avanço por dente maior, 0.20 mm, apresentam um desgaste de flanco menor, no entanto o tempo de vida foi inferior relativamente aos ensaios em que se utilizou 0.15mm. Realizaram-se os restantes ensaios com 0.15mm, de avanço por dente, uma vez que com 0.20mm as pastilhas entraram em rutura, devido ao desgaste de entalhe.

Inicialmente, foi utilizada a transformada rápida de Fourier (FFT) para analisar os valores de aceleração obtidos pelo acelerómetro, onde os resultados obtidos ao longo do tempo se encontram indicados nas figuras (*Figura 3.26*, *Figura 3.27* e *Figura 3.28*) abaixo, tal como a fotografia do desgaste do gume 3 da ferramenta de corte.

De modo a relacionar o desgaste da aresta de corte da ferramenta com o sinal de vibração adquirido, foi utilizada numa primeira fase a transformada rápida de Fourier (FFT). Optou-se por apenas apresentar o resultado para o eixo Z do acelerómetro, o qual corresponde ao sentido de avanço da ferramenta no corte (eixo X no centro de maquinagem) pois é neste eixo que se registam as alterações mais significativas.

Conforme é possível concluir a partir da análise das *Figura 3.26*, *Figura 3.27* e *Figura 3.28*, o primeiro pico corresponde à frequência natural de vibração da árvore da fresadora. Os picos das harmónicas ocorrem todos nos mesmos valores de frequência, permitindo relacionar o aumento da amplitude do sinal com a degradação da aresta de corte. Este efeito é particularmente identificado para o pico registado a aproximadamente 780 Hz, para o qual é bastante notório o aumento da amplitude deste pico com a maior degradação da ferramenta. Apenas foi detetado uma alteração significativa da intensidade do pico observado a 780Hz no eixo “Z” do acelerómetro, o qual corresponde ao eixo “X” no centro de maquinagem. Este eixo “Z” (“X” do centro de maquinagem) é aquele que ao longo do qual foi efetuado o corte do aço inoxidável

duplex, e que por isso é esta direção a mais afetada pela vibração quando a ferramenta se degrada, sendo por este motivo apenas estar este eixo representado nas seguintes figuras.

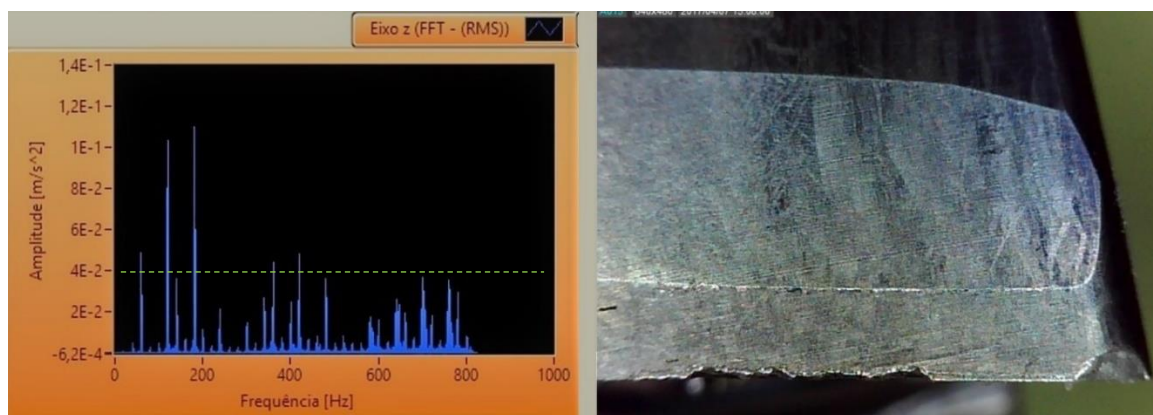


Figura 3.26 - Representação gráfica (Ensaio 1, decorridos 5 minutos) da análise FFT vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3

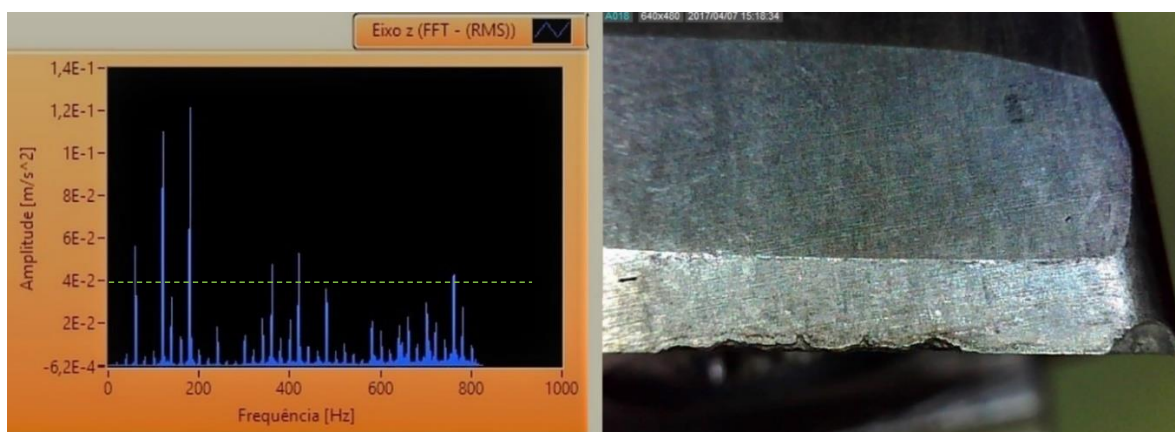


Figura 3.27 - Representação gráfica (Ensaio 1, decorridos 10 minutos) da análise FFT vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3

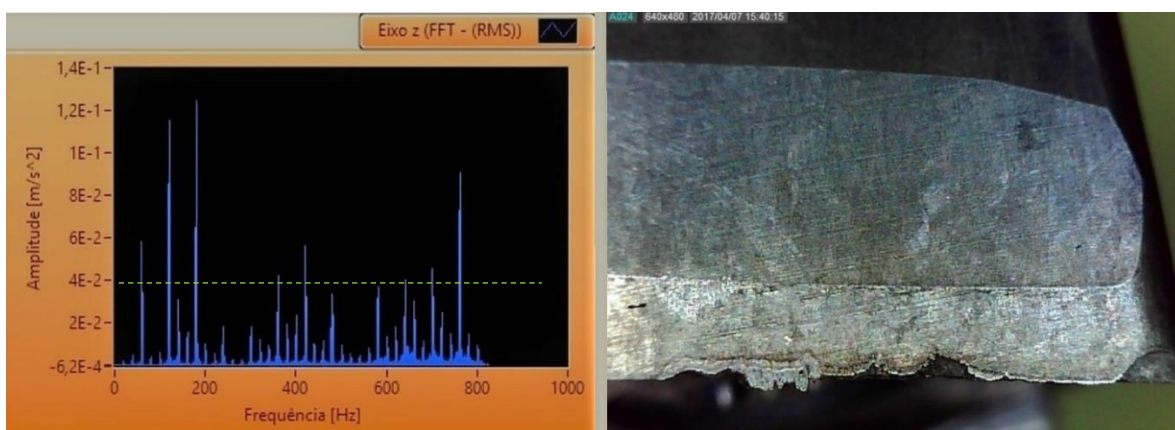


Figura 3.28 - Representação gráfica (Ensaio 1, decorridos 20 minutos) da FFT vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3

Seguidamente, foram utilizadas 1/3 de oitavas para analisar os valores obtidos pelo acelerómetro, onde os resultados das vibrações ao longo do tempo se encontram indicados nas figuras (Figura 3.29, Figura 3.30 e Figura 3.31) efetuando a comparação, com a fotografia do desgaste do gume 3 da ferramenta de corte.

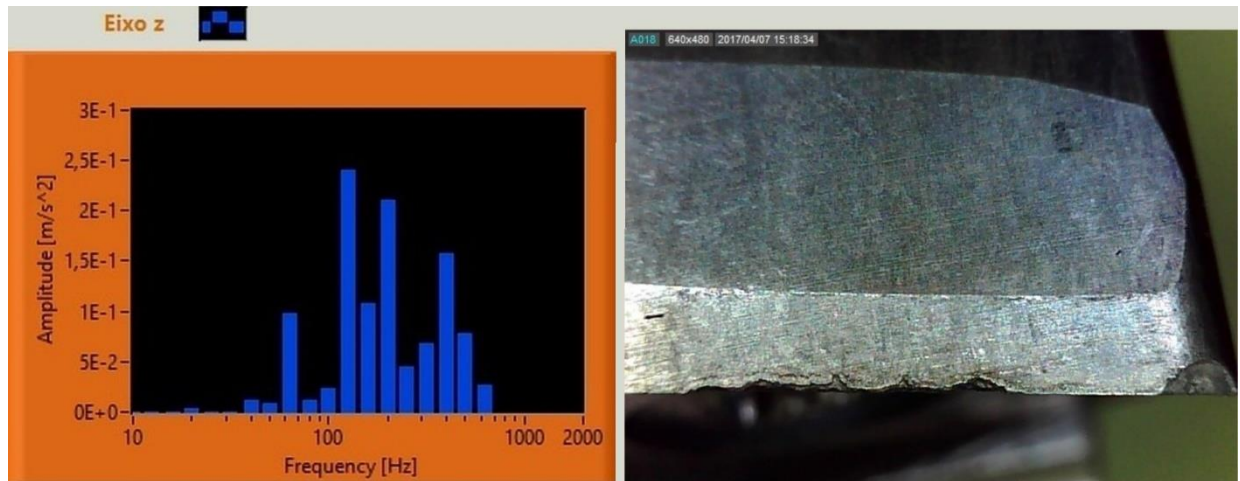


Figura 3.29 - Análise gráfica de 1/3 de oitavas (Ensaio 1 decorridos 10 minutos) vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3

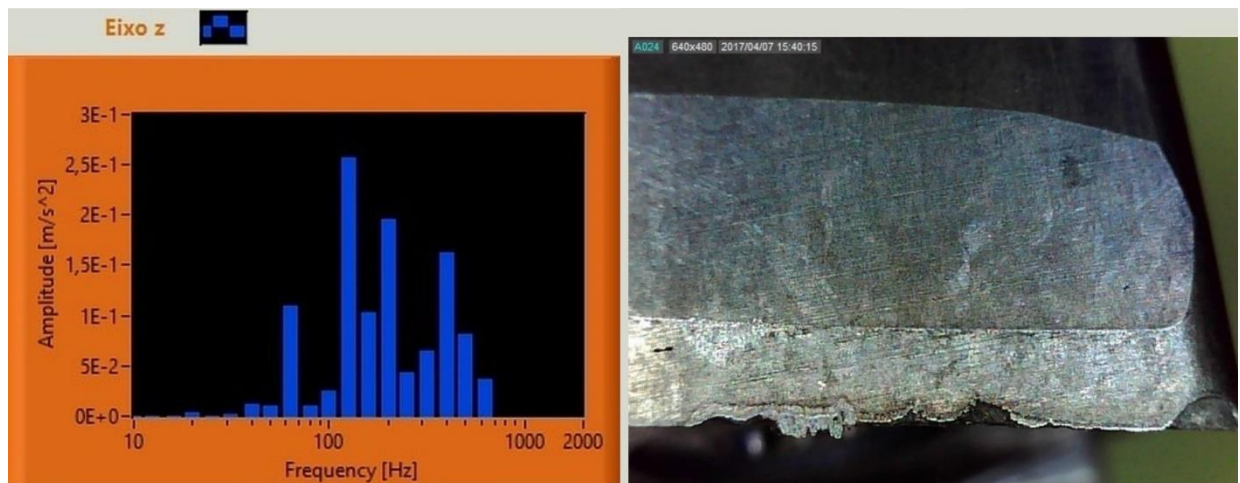


Figura 3.30 - Análise gráfica de 1/3 de oitavas (Ensaio 1 decorridos 20 minutos) vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3

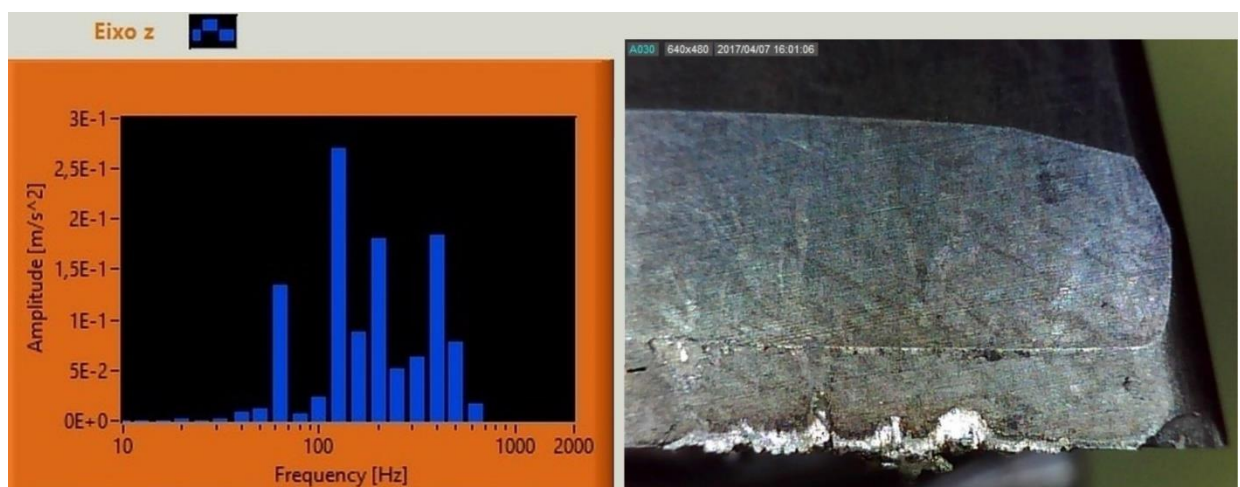


Figura 3.31 - Análise gráfica de 1/3 de oitavas (Ensaio 1 decorridos 30 minutos) vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3

Tal como no caso da análise por FFT, os picos ocorrem todos nos mesmos valores de frequência, e o estudo da sua evolução reflete o grau de desgaste da ferramenta durante o processo de maquinação.

Por fim, foi analisado um caso de desgaste extremo, o ensaio 3, utilizando um f_z de 0.15 mm/dente e passo radial com 7% do D_{cap} (2.24 mm). Para este efeito foram utilizadas 1/3 de oitavas, para analisar os valores de aceleração obtidos pelo acelerómetro, onde os resultados das vibrações ao longo do tempo se encontram indicados nas figuras (Figura 3.32 e Figura 3.33), assim como a fotografia do desgaste do gume 3 da ferramenta de corte. Os correspondentes valores de desgaste obtidos na aresta de corte são apresentados nas Tabela 3.7 Tabela 3.8.



Figura 3.32 - Análise gráfica de 1/3 de oitavas (Ensaio 3 decorridos 5 minutos) vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3



Figura 3.33 - Análise gráfica de 1/3 de oitavas (Ensaio 3 decorridos 10 minutos) vs Desgaste da ferramenta na face de saída principal do gume 3

Tabela 3.7 - Valores de desgaste de flanco obtidos no ensaio 3

Tempo [min]	Gume 1 [mm]	Gume 2 [mm]	Gume 3 [mm]
5	0,22	0,22	0,22
10	0,25	0,33	0,33

Tabela 3.8 - Valores de desgaste de entalhe obtidos no ensaio 3

Tempo [min]	Gume 1 [mm]	Gume 2 [mm]	Gume 3 [mm]
5	0,33	0,43	0,51
10	0,49	0,78	1,03

Este exemplo mostra um caso de desgaste extremo onde as pastilhas, da ferramenta de corte, após 10 minutos de maquinação, atingiram o final da sua vida, onde ocorreu um enorme aumento do grau de desgaste da ferramenta nos últimos 5 minutos de maquinação. Através da leitura do gráfico de oitavas, conclui-se que é possível detetar as anomalias no processo de maquinação, em que nesta situação uma velocidade de corte elevada levou a que se atingisse o fim da vida útil da ferramenta.

Em suma, é possível afirmar que tanto através análise do gráfico da transformada rápida de Fourier (FFT) como da análise do gráfico de 1/3 de oitavas é possível antecipar uma situação desfavorável na evolução do desgaste da ferramenta, em que se pode interromper o ciclo quando se atingem determinados valores de vibração, prolongando desta forma a vida útil das ferramentas de corte.

Nesta seção foram analisados com detalhes os ensaios 1 e 3 realizados. Os restantes ensaios serviram para o trabalho realizado no capítulo seguinte, conforme se apresentará em seguida.

Capítulo 4

Previsão do Desgaste da Ferramenta de Corte

Tendo como objetivo desenvolver um procedimento de previsão do desgaste da ferramenta de corte na maquinagem do aço inox duplex, e uma vez que o problema do desgaste das ferramentas não pode ser abordado através da matemática convencional já que este é um problema não linear, optou-se então por testar uma aplicação de redes neurais e lógica difusa nos problemas associados ao desgaste das ferramentas de corte.

4.1 Redes Neurais

4.1.1 Redes Neurais Artificiais

O trabalho em Redes Neurais Artificiais (RNAs) tem sido motivado e desenvolvido pelo reconhecimento de que o cérebro humano processa todas as informações captadas de uma forma muito própria. O cérebro pode ser comparável a um computador altamente complexo. Ele tem a capacidade de estruturar e organizar as suas unidades de processamento, conhecidas por neurónios, de forma a realizar um processamento muito mais rápido do que qualquer outro computador digital hoje existente, para algumas funções particulares como por exemplo reconhecimento de padrões (imagens, texto escrito manualmente). Uma rede neuronal artificial pode considerar-se inspirada nessa interpretação do funcionamento do cérebro humano. Sendo, no entanto, bastante diferente quer na dimensão, quer no modelo e funcionamento dos seus elementos (Pinto, 2007). As redes neurais artificiais são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neuronal de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência. Uma rede neuronal artificial pode ter centenas ou milhares de unidades de processamento, já o cérebro de um ser humano pode ter muitos milhões de neurónios (USP, 2017).

Os modelos de redes neurais realizam a manipulação de informações através da interação de um grande número de unidades básicas de processamento, às quais se dá o nome de neurónios artificiais, frequentemente designados por nós, sendo fundamental a forma e tipo de interligações entre esses elementos. As RNAs podem apresentar uma ou mais camadas intermédias.

Do ponto de vista prático, as RNAs têm como vantagem o facto de não necessitarem de conhecimento explícito do problema para tomar decisões, elas baseiam-se unicamente nos

exemplos que lhes são fornecidos. As RNAs podem ser utilizadas na solução de uma grande quantidade de problemas encontrados nas mais diversas áreas de aplicação: classificação, diagnóstico, análise de sinais e de imagens, reconhecimento de padrões, otimização e controlo. As redes são particularmente eficientes na resolução de problemas em que não se dispõe de uma formulação analítica, nem conhecimento explícito acessível. No limite pode considerar-se uma RNA como uma “caixa de processamento” de entradas e saídas que pode ser treinada com base num conjunto limitado de exemplos, conforme representado na Figura 4.1 (Pinto, 2007).

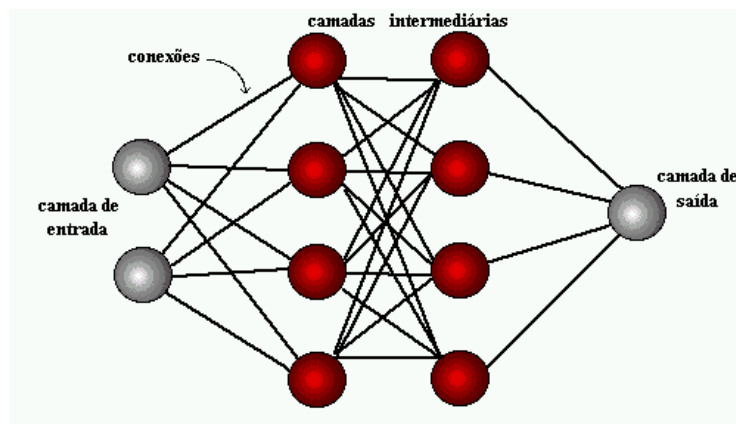


Figura 4.1 – Representação de uma Rede Neuronal Artificial (USP, 2017)

Em geral podemos considerar que uma rede neuronal é constituída por unidades de processamento ou nós (neurónios) e ligações entre esses nós, definindo a tipologia ou arquitetura da rede. Outro aspeto determinante é o processo ou algoritmo, que define a forma de ajuste dos parâmetros da rede de forma a fornecer uma solução para um dado problema. Por norma, pode dizer-se que existem várias alternativas em relação à configuração de uma rede neuronal com base nestes elementos, desde a escolha das funções que são implementadas em cada nó, do efeito de cada uma das ligações entre os nós, à tipologia e número de elementos utilizados. Ainda em relação aos algoritmos de treino, ou ajuste dos parâmetros da rede, existem atualmente várias alternativas.

Um neurónio artificial, ou nó, é a unidade fundamental de processamento de uma RNA, o qual recebe uma ou mais entradas, transformando-as em saídas. Cada entrada tem um peso associado, que determina sua intensidade. O esquema do neurónio artificial pode ser visualizado na Figura 4.2, onde:

- a_i são as entradas na rede neuronal;
- w_{ji} são os pesos das conexões;
- b_j é o bias;
- net_j é o valor de ativação;
- y_j é a saída real (Pinto, 2007).

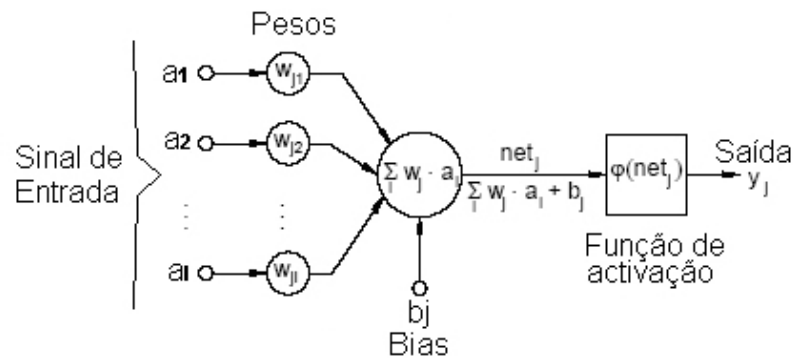


Figura 4.2 – Esquema de funcionamento de um Neurónio Artificial (Pinto, 2007)

De modo a estabelecer um paralelo comparativo, a Figura 4.3 ilustra um neurónio humano lado a lado com uma rede neuronal artificial. Os neurónios comunicam através de sinapses (região onde dois neurónios entram em contato e através da qual os impulsos nervosos são transmitidos entre eles). Num neurónio designado por “A”, os impulsos recebidos através das dendrites, num certo momento são processados. Ao atingir um determinado patamar de ação, o neurónio é acionado, produzindo uma substância neurotransmissora que flui do corpo celular para o axónio, que pode estar conectado a uma dendrite de um outro neurónio “B”. O neurotransmissor pode inibir ou impulsionar a geração dos impulsos no neurónio designado por “B”. Este processo depende de vários fatores, como a geometria da sinapse e o tipo de neurotransmissor. Em média, cada neurónio forma entre mil e dez mil sinapses. O cérebro humano possui cerca de 10×10^{11} neurónios, e o número de sinapses é de mais de 10×10^{14} , possibilitando a formação de redes muito complexas (USP, 2017). Em suma, as dendrites são zonas recetivas, o corpo celular é onde se inicia a codificação da saída, os axónios constituem a linha de transmissão e os terminais sinápticos transmitem o “aprendido” para outro neurónio.

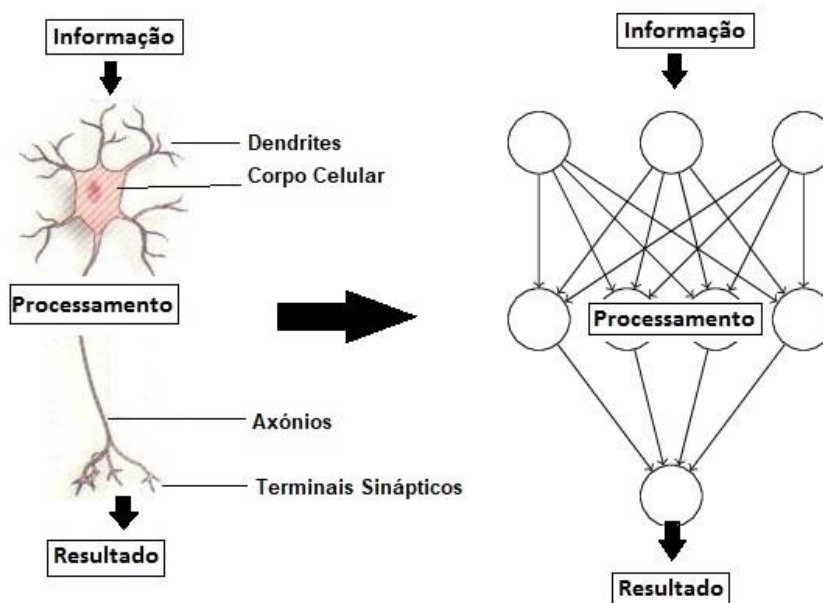


Figura 4.3 – Exemplificação do funcionamento de um neurónio humano (esquerda) e uma rede neuronal artificial (direita)

No caso das RNAs, cada neurónio artificial (nó) possui um valor interno chamado valor de ativação, o qual é modificado sempre que uma nova entrada é recebida. Essas entradas são combinadas e um novo valor de ativação é calculado através de uma função. Por outro lado, a saída do neurónio é calculada aplicando uma função de saída. Esta saída serve de entrada para o neurónio seguinte e assim sucessivamente.

Uma rede neuronal pode apresentar várias configurações, tais como ação direta ou recorrente, conforme representado na Figura 4.4. A ação direta (“feedforward”) caracteriza-se por uma interligação entre apenas os neurónios da camada inferior e da camada imediatamente superior. Por sua vez, a configuração é chamada recorrente quando um neurónio se pode interligar e receber entradas, de qualquer outra camada da rede (Pinto, 2007).

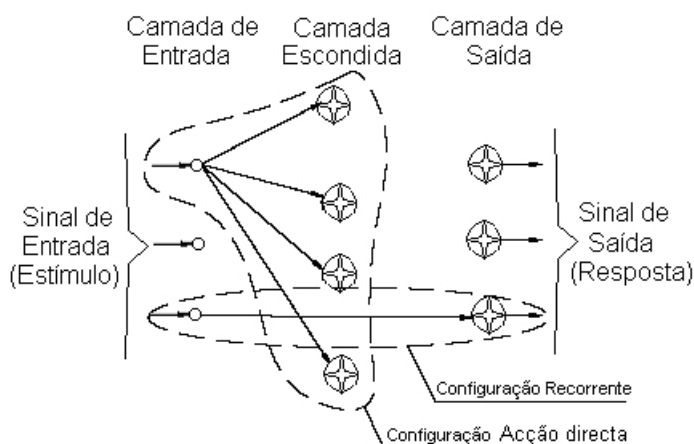


Figura 4.4 - Configuração da rede neuronal exemplificando a ação direta e a ação recorrente (Pinto, 2007)

Qualquer unidade da rede pode receber sinais de outras unidades. Essas ligações influenciam o efeito que a saída de uma unidade exerce sobre as outras unidades. Os pesos, ou ligações, podem ter uma influência positiva ou negativa, ou seja, inibidor na ação seguinte. A combinação das entradas normalmente é efetuada pelas somas ponderadas, tal como é possível observar na Figura 4.2, sendo gerada uma entrada total que serve de base para a alteração do estado interno da unidade. O sinal da saída de uma unidade é função do seu valor de ativação.

A principal característica de uma rede neuronal é a sua capacidade de aprender e se ajustar, levando a que normalmente se tenham em conta duas fases no processo de utilização de uma rede: uma fase de treino e uma fase de utilização ou teste. Durante o treino ocorre um ajuste dos parâmetros internos da rede, de maneira a que a rede apresente um resultado esperado dada a apresentação de um conjunto de padrões específicos (Pinto, 2007).

Consistindo normalmente num algoritmo, a fase de treino, ajusta os pesos de forma a minimizar uma função de erro. Desta forma, o “conhecimento” ou “memória” da rede fica distribuído pelos pesos ou ligações da rede.

4.1.2 Algoritmo de Treino da Rede

O algoritmo de retropropagação (“backproagation”) assumiu um papel determinante na evolução e desenvolvimento de redes neurais artificiais. Demonstrou-se que uma rede neuronal com camadas intermédias e um número de nós adequado, pode mapear qualquer função não linear. Aplica-se a redes multicamada, de ação direta e baseia-se na utilização do método do gradiente para ajustar o valor dos pesos das ligações entre nós da rede, de forma iterativa. Os nós da rede têm valores de ativação em função dos pesos associados a cada entrada, conforme descrito pela (Equação 4.1).

$$net_j = \sum w_{ji} * a_i + b_j$$

(Equação 4.1)

- net_j - Valor de ativação
- a - Entradas
- b - Bias
- w - Pesos

O ajuste dos pesos é definido com base na minimização do erro quadrático médio, entre o valor de saída da rede e o valor desejado (Equação 4.2), sendo necessário apenas que as funções de saída dos nós, sejam diferenciáveis, como por exemplo as funções logarítmicas, tangente hiperbólica e a função linear. Na sua forma original, é utilizado um coeficiente de aprendizagem (“learning rate”), que determina em cada passo o valor utilizado na variação dos pesos. Seguidamente é aplicado outro coeficiente denominado por momento (“momentum term”), para contabilizar as variações no passo anterior do algoritmo (Pinto, 2007).

$$erro_j = t_j - y_j$$

(Equação 4.2)

t_j - saída desejada;

y_j - saída da rede

O erro médio quadrático (Equação 4.3) mostra a capacidade de previsão do modelo desenvolvido, e pode ser calculado da seguinte forma:

$$RMS = \frac{1}{2} \sum (erro_j)^2$$

(Equação 4.3)

A implementação mais simples do “backproagation” aprende as atualizações dos “pesos” e do “bias” da rede na direção na qual a função de desempenho diminui rapidamente (gradiente descendente). Uma iteração (Equação 4.4) deste algoritmo pode ser escrita da seguinte forma:

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k g_k$$

(Equação 4.4)

Onde:

- x_k - vetor dos pesos e bias atuais;
- g_k - gradiente atual;
- α_k - taxa ou coeficiente de aprendizagem (“learning rate”).

Conforme apresentado na Figura 4.5, numa rede neuronal com ação direta os dois tipos de sinal que podem existir são:

- O sinal funcional, que é um sinal de entrada que se propaga para a frente através da rede neuronal e termina na camada de saída como um sinal de saída;
- O sinal de erro, que se inicia no nó de saída e propaga-se para trás através da rede neuronal.

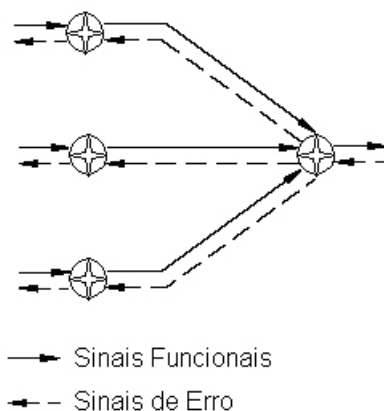


Figura 4.5 - Esquema de propagação e retropropagação dos sinais (Pinto, 2007)

A representação, ou codificação do problema a ser tratado numa rede neuronal, está diretamente associada à especificação dos elementos de entrada e dos elementos de saída. Nesta codificação é comum normalizarem-se os valores no intervalo $[-1 \ 1]$ ou $[0 \ 1]$, com o objetivo de melhorar a eficiência da rede.

Os conjuntos de teste não são apresentados durante a fase de treino, esta separação depende do problema em causa, sendo comum usarem-se 15-20% do total de dados para o conjunto de teste.

Outro aspeto determinante no processo de treino da rede reside na capacidade de definir quando é que o treino deve parar de modo a não comprometer a possibilidade de generalização da rede. Caso seja prolongado o número de iterações de treino a rede terá tendência para melhorar a sua eficiência nos casos de treino (“overfitting”), mas piorar nos casos de teste.

Sendo uma das características das redes neurais começar o processo de treino a partir de um estado dos seus parâmetros definido de modo aleatório, o processo de convergência pode ser muito dependente desse ponto inicial. Deve-se repetir, para a mesma rede, várias vezes o mesmo procedimento de modo a identificar essas situações (Pinto, 2007).

4.2 Lógica difusa

A Lógica Difusa é uma ferramenta capaz de captar informações vagas, em geral descritas utilizando uma linguagem natural, por exemplo, “quente”, “muito frio”, “talvez” e convertê-las para um formato de fácil manipulação pelos computadores.

Com base na experiência de peritos, o uso de variáveis linguísticas fica mais perto do pensamento humano, nomeadamente na eficácia do controlo de processos com comportamento complexo não linear.

O sistema de controlador difuso é um método que funciona da seguinte maneira:

- As características de entrada são incorporadas nas funções de pertença;
- As entradas das funções de pertença são incorporadas em regras;
- As regras definem um conjunto de características de saída;
- As características de saída definem as saídas das funções de pertença;
- As saídas das funções de pertença definem um valor de saída;
- A decisão é associada à saída (Pinto, 2007).

4.2.1 ANFIS –Adaptative Neuro Fuzzy Interference System

É sabido que existem alguns modelos onde não se pode, apenas, olhar e descrever as funções de pertença. Em vez de se escolherem arbitrariamente os parâmetros associados às funções de pertença, estes podem ser escolhidos de maneira a responder às variações dos valores de entrada/saída. A este processo é dado o nome de “neuro-adaptive” técnica de aprendizagem incorporada no sistema difuso – ANFIS (Pinto, 2007).

Em geral, as formas das funções de pertença dependem dos parâmetros que podem ser ajustados para mudar a forma dessas mesmas funções.

Os parâmetros que podem ser ajustados automaticamente dependem dos dados a modelar. O modelo de validação com o conjunto de dados “Checking” e “testing” serve para validar e verificar o modelo em estudo.

São utilizados os dados de validação para verificar e controlar a performance do modelo.

Os dois parâmetros do método de optimização do ANFIS, para o treino FIS, são:

- Híbrido – por defeito, é uma junção de mínimos quadrados e o “backpropagation”.
- “Backpropagation” (Pinto, 2007).

A tolerância do erro é usada como critério para terminar o treino. O treino irá parar depois do erro de treino se encontrar dentro da tolerância estipulada.

As regras da lógica difusa são do tipo “SE A... então B”, onde A e B são variáveis da rede neuronal, como por exemplo: “Se a pressão é elevada o volume é pequeno”. Os primeiros

sistemas de controlo construídos utilizavam o método Mamdani na aplicação de lógica difusa, este método é totalmente aceite para captar procedimentos experimentais. Permite descrever a experiência de uma forma mais intuitiva, de uma forma mais “humana”. No entanto, este método representa um grande peso a nível computacional (MathWorks, 2017). Por outro lado, temos o modelo Sugeno que é um método computacionalmente mais efetivo, funcionando bem em processos de otimização e adaptação, tornando-o uma escolha interessante, particularmente em sistemas não lineares. O modelo Sugeno tem duas entradas x e y e uma saída z . Um modelo Sugeno de primeira ordem tem regras como as seguintes:

Regra 1 - Se x é A1 e y é B1, então: $f_1 = p_{1x} + q_{1y} + r_1$

(Equação 4.5)

Regra 2 - Se x é A2 e y é B2, então: $f_2 = p_{2x} + q_{2y} + r_2$ (G.Anuradha, 2017)

(Equação 4.6)

4.2.2 Metodologia de treino

Antes de explicar a metodologia de treino é necessário explicar a constituição dos blocos do controlador difuso.

Conforme é representado na Figura 4.6 um controlador difuso é constituído por:

- Um “fusificador” que é responsável pela conversão de variáveis linguísticas em valores linguísticos modo a tornar a informação compatível com a representação interna do controlador difuso;
- Uma base de conhecimento que se subdivide em base de dados e base de regras;
 - A base de dados é responsável por disponibilizar a informação necessária ao funcionamento dos módulos de “fusificação” e “desfusificação”, sob a forma de funções de pertença e fatores de escala;
 - A base de regras contém um determinado número de regras “se-então”, uma unidade de tomada de decisão, que realiza o cálculo do valor difuso global da saída do controlador, realizando as operações provenientes das regras;
- Uma interface “desfusificadora”, que realiza a operação de conversão da saída difusa do controlador (Pinto, 2007) (G.Anuradha, 2017).

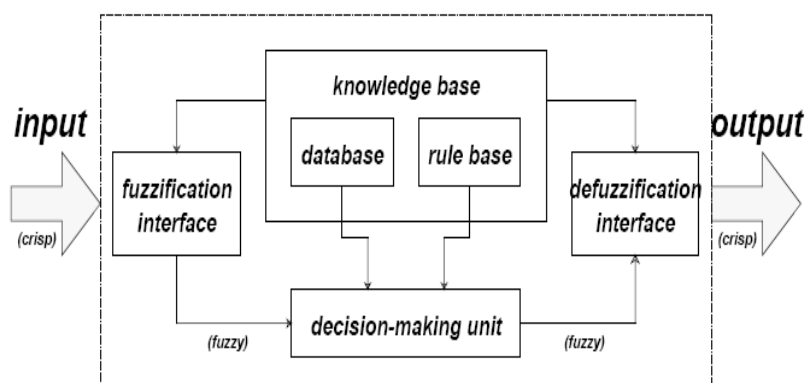


Figura 4.6 - Representação de controlador difuso (G.Anuradha, 2017)

Durante o processo da “fusificação” é feita uma descrição de uma ou várias variáveis por intermédio de expressões linguísticas que caracterizam todas as situações, por exemplo “alto”, “baixo”, “comprido”, “curto”, etc. Uma etiqueta linguística representa-se matematicamente por um conjunto difuso, formado por vários valores lógicos referentes à possibilidade de ocorrência. Os valores de um conjunto difuso encontram-se compreendidos entre 0 e 1. Normalmente o número de etiquetas linguísticas é um número ímpar entre 3 e 7 (5 ± 2). Estes limites do número de etiquetas linguísticas devem-se aos vários tipos de capacidade de memória do ser humano, onde o limite inferior é o conhecimento geral e o limite superior é relativo à memória a curto prazo dos seres humanos (Pinto, 2007).

Na Figura 4.7 podem ver-se o tipo de funções de pertença de entrada mais utilizados, que são do tipo triangular, trapezoidal ou radial.

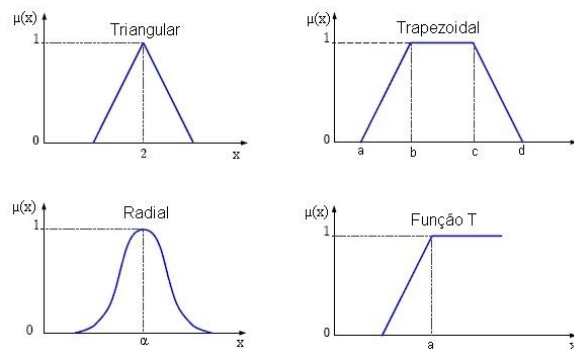


Figura 4.7- Representação gráfica de alguns exemplos de funções de pertença (Pinto, 2007)

No método Sugeno, para as funções de saída, não existem operações de agregação. Apenas existem funções de pertença constantes ou lineares (Raol, 2015).

O processo de “desfusificação” realiza a conversão de conjuntos difusos em valores reais. Seguidamente, temos a fase final do processamento, onde se começa pela extração difusa, escolhendo o valor da variável linguística de saída do sistema. O problema resume-se à definição de uma metodologia adequada. Os métodos de “desfusificação” dividem-se em duas situações:

- Se o modelo de lógica difusa utilizado é do tipo Mamdani;
- Se o modelo de lógica difusa utilizado é do tipo Sugeno.

No primeiro caso, do tipo Mamdani, os métodos de “desfusificação” mais comuns são:

- Centro da área, que consiste em determinar o centro da área da função de saída, esta operação é computacionalmente complexa, o que origina frequentemente ciclos de interferência algo lentos;
- Bissetriz, que consiste em determinar um valor da bissetriz na área de um triângulo, este método é computacionalmente leve e de implementação extremamente simples;
- Média dos máximos, que consiste em determinar o valor médio em “X” de um máximo, este método é computacionalmente leve e de implementação simples;
- Menor dos máximos, que consiste em determinar o menor valor absoluto em “X” de um máximo, sendo um método computacionalmente leve e de simples implementação;

- Maior dos máximos, que consiste em determinar o maior valor absoluto em “X” de um máximo, sendo também um método computacionalmente leve e de simples implementação (Pinto, 2007) (FunctionBay, 2017).

A Figura 4.8 ilustra de forma gráfica este método.

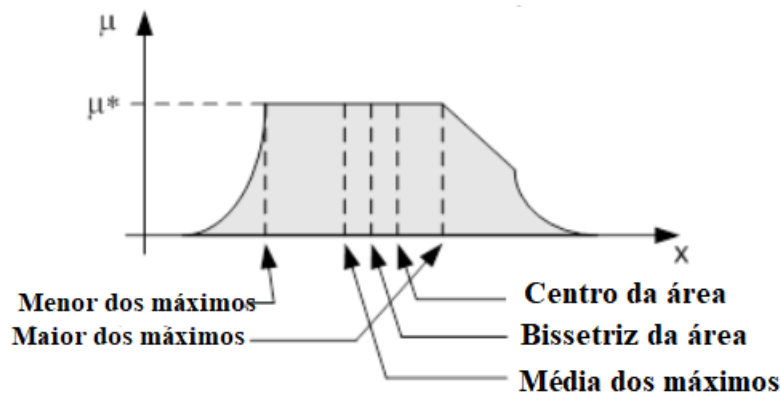


Figura 4.8 - Representação gráfica dos métodos de desfusãoção do modelo do tipo Mamdani (Access, 2017)

No segundo caso, do tipo Sugeno, os métodos de “desfusãoção” mais comuns são:

- Valor médio ponderado, que consiste num cálculo da média ponderada baseado nos valores de pico, sendo um método computacionalmente leve e de simples implementação, porém para casos mais complexos pode-se tornar pesado a nível computacional;
- Valor da soma ponderada, que consiste num cálculo da soma ponderada baseado nos valores de pico, sendo um método computacionalmente leve e de simples implementação (Access, 2017).

Na Figura 4.9 encontra-se representado um exemplo da aplicação do método, do valor médio ponderado, que pode ser expresso pela (Equação 4.7):

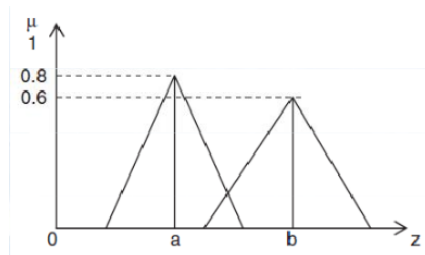


Figura 4.9 - Representação gráfica, do método de desfusãoção, valor médio ponderado (NUUA, 2017)

$$z_0 = \frac{\sum \mu(x)_i * W_i}{\sum \mu(x)_i}$$

(Equação 4.7)

Onde:

- μ - Valor da função de pertinência;
- W- Valor do peso da conexão (Access, 2017).

Em suma, a lógica difusa fornece uma aproximação ao problema, completamente diferente dos métodos matemáticos tradicionais. É preferível concentrarmo-nos na resolução do problema do que tentar modelar o sistema matematicamente. Uma vez percebido o conceito desta tecnologia, torna-se mais fácil implementá-la e os resultados obtidos geralmente são satisfatórios.

4.3 Modelo ANFIS aplicado no processo de maquinagem

Para construir o modelo ANFIS que traduz a situação em estudo, utilizou-se uma toolbox do software MATLAB®. Conforme ilustrado na Figura 4.10 e na Figura 4.11 utilizou-se a velocidade de corte (V_c), o tempo de maquinação e o valor do RMS registado no software de aquisição do sinal do acelerómetro, como variáveis de entrada. Por outro lado, como variável de saída foi utilizado o valor do desgaste médio dos 3 gumes de corte.

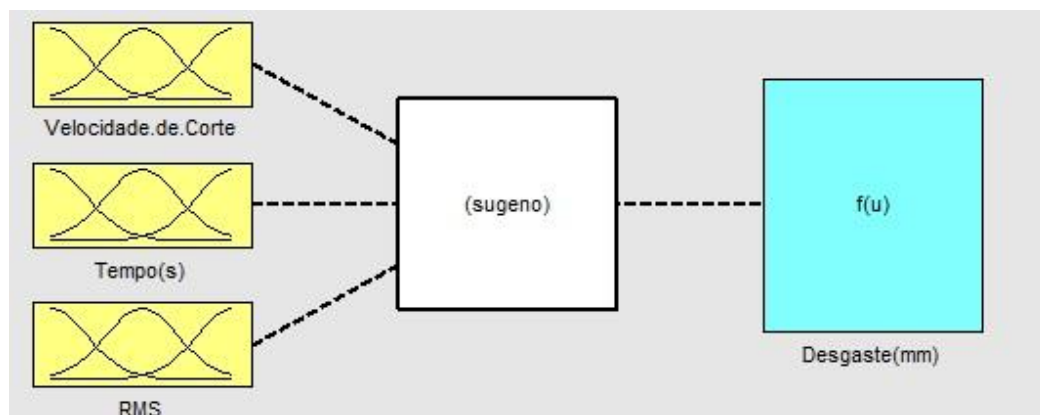


Figura 4.10 - Modelo ANFIS utilizado na previsão do desgaste

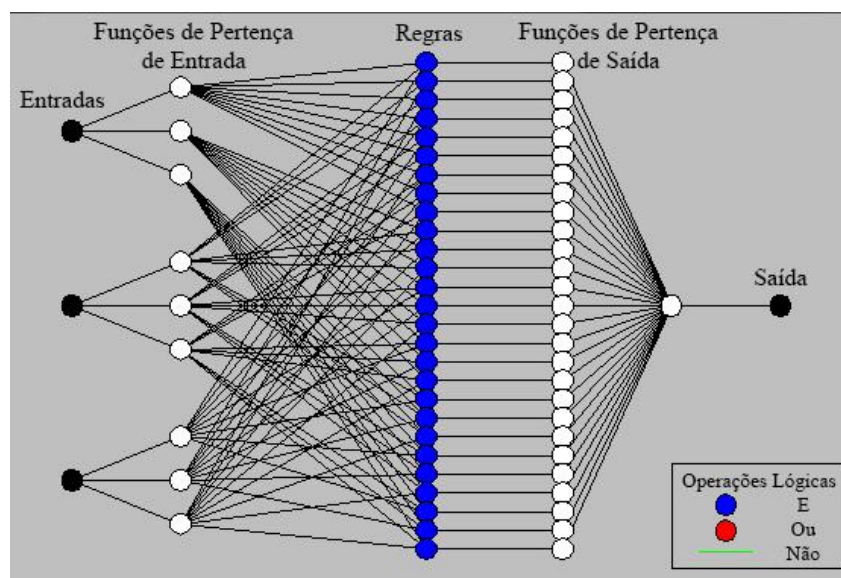


Figura 4.11 - Configuração do modelo ANFIS

Seguidamente, realizou-se o processo de validação para testar o modelo e minimizar o erro de treino da rede, afinando as definições e os parâmetros da rede neuronal. Os dados de treino correspondem a 80% dos dados, os restantes 20% são valores de teste da rede neuronal. Chama-se à atenção que na etapa de treino da rede, todos os dados utilizados foram obtidos no trabalho experimental apresentado no capítulo 3. Na etapa seguinte, para o teste da rede, compara-se o resultado de saída obtido experimentalmente para o desgaste médio, com o resultado de saída obtido por simulação para o desgaste médio.

Para modelar o desgaste da ferramenta de corte, foi usado o algoritmo híbrido para treinar a rede neuronal. Utilizou-se o modelo de lógica difusa “Sugeno”, com recurso ao método de “desfusificação” do valor médio ponderado. Neste modelo utilizou-se também partição em grelha, onde se utilizaram 9 funções de pertença nos valores de entrada e 26 regras para mapear os dados de entrada e saída, como se pode visualizar na Figura 4.11. Atendendo que a aquisição da vibração foi feita por um acelerómetro triaxial, registando o sinal de vibração ocorrido em cada um dos eixos (“X”, “Y”, “Z”), é necessário proceder à determinação do valor de RMS do sinal. Desta forma, para cada um dos três eixos de referência obtém-se o valor eficaz de aceleração ponderada em RMS (RMS (x), RMS (y), RMS (z)), sendo a partir destes valores de aceleração ponderada em RMS que se determina o valor total da vibração através da seguinte expressão ((RELACRE, 2014)):

$$RMS = \sqrt{RMS(x)^2 + RMS(y)^2 + RMS(z)^2}$$

(Equação 4.8)

Inicialmente foi feita uma previsão para o desgaste de flanco onde os parâmetros de entrada e de saída, utilizados para o treino da rede, encontram-se indicados na Tabela 4.1, e os parâmetros de entrada e de saída, utilizados para testar a rede, encontram-se indicados na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - Variáveis de entrada utilizados para treino da rede

Variáveis de treino			
Velocidade de Corte	Tempo	RMS	Desgaste médio
[m/min]	[s]	[m/s²]	[mm]
120	300	0.9395	0.110
120	600	0.9479	0.157
120	900	1.0358	0.180
120	1200	1.1259	0.233
120	1500	1.0932	0.230
120	1800	1.0669	0.320
240	300	1.3893	0.220
240	600	1.3468	0.303
100	300	0.9718	0.07
100	600	0.9652	0.103
100	900	0.8485	0.127
100	1200	0.7787	0.153
200	300	1.0962	0.180
200	600	1.2511	0.270
200	900	1.2618	0.320
200	1200	1.2144	0.513
180	300	1.1924	0.213
180	600	0.9501	0.247
180	900	0.9880	0.260
160	300	1.3155	0.008
160	600	1.2668	0.110
160	900	1.1176	0.140
160	1200	1.0433	0.153

Tabela 4.2 - Variáveis de saída utilizadas para testar a rede

Variáveis de teste				
Número de Amostra	Velocidade de Corte [m/min]	Tempo [s]	RMS [m/s ²]	Desgaste médio [mm]
1	140	300	0.9718	0.053
2	140	600	0.9501	0.077
3	140	900	0.9880	0.097
4	140	1200	1.0218	0.117

4.4 Realização dos testes do modelo ANFIS

Conforme foi dito anteriormente, no método Sugeno não são utilizadas operações de agregação, apenas existem funções de pertinência de saída lineares ou constantes. Para testar o modelo, foram realizadas previsões utilizando as funções de pertinência de entrada mais comuns (triangulares, trapezoidais e radiais), para cada tipo de função de pertinência de saída.

Inicialmente, nas previsões realizadas foram utilizadas para as variáveis de entrada, funções de pertinência triangulares, e para as de saída uma função de pertinência constante (Figura 4.12) e linear (Figura 4.13).

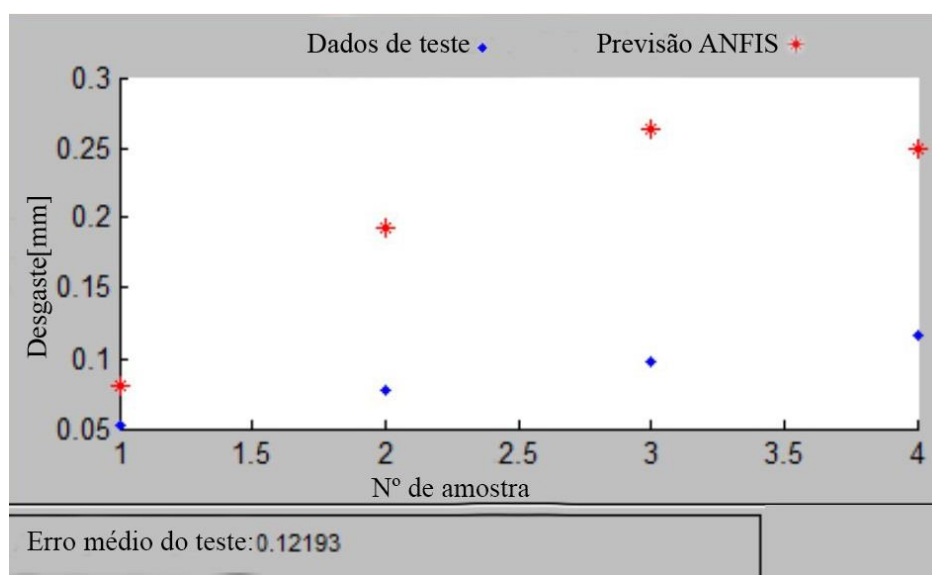


Figura 4.12 - Previsão do desgaste de flanco utilizando nas variáveis de entrada funções de pertinência triangulares, e nas variáveis de saída uma função de pertinência constante

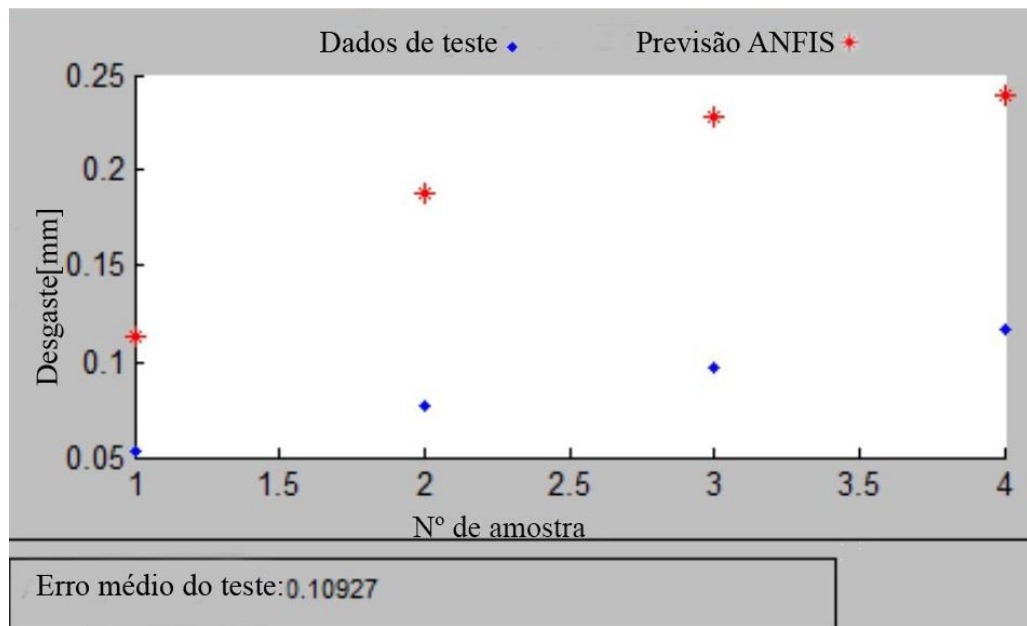


Figura 4.13 – Previsão do desgaste de flanco utilizando nas variáveis de entrada funções de pertinência triangulares, e nas variáveis de saída uma função de pertinência linear

Seguidamente, foram realizadas previsões utilizando para as variáveis de entrada, funções de pertinência trapezoidais, e para a saída uma função de pertinência constante (Figura 4.14) e linear (Figura 4.15).

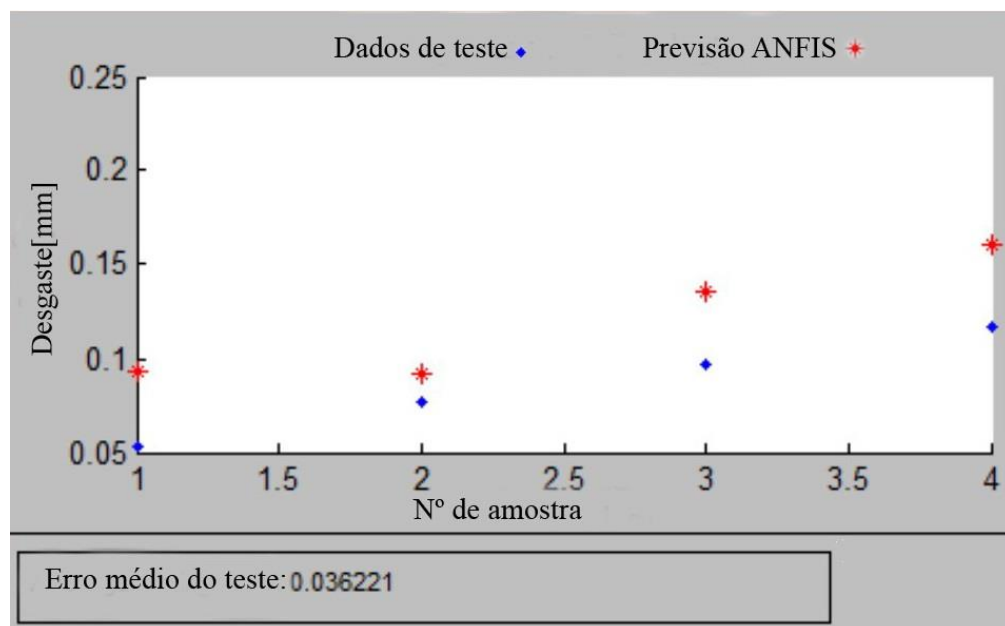


Figura 4.14 – Previsão do desgaste de flanco utilizando nas variáveis de entrada funções de pertinência trapezoidais, e nas variáveis de saída uma função de pertinência constante

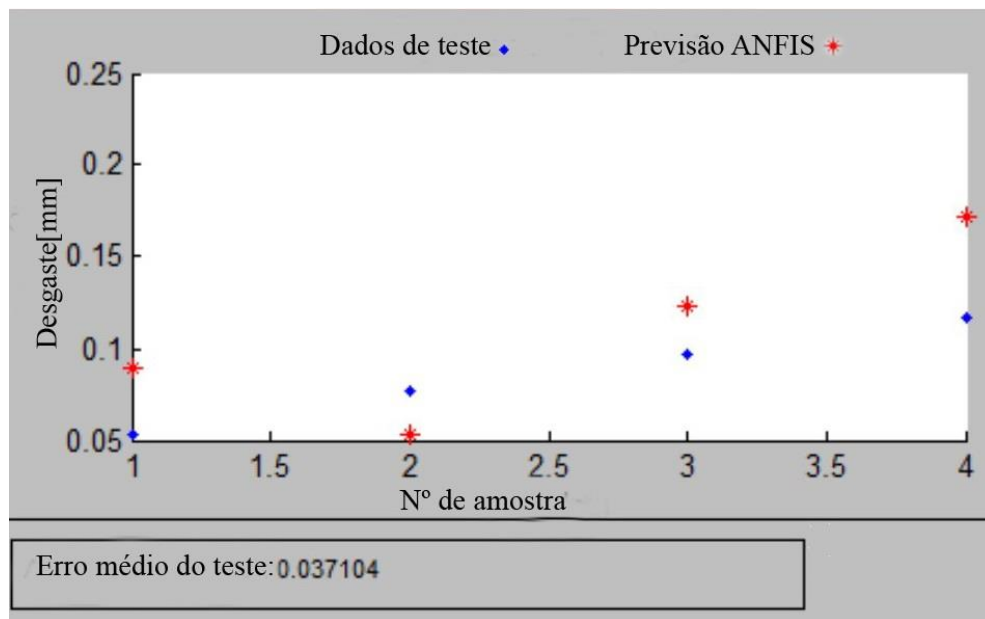


Figura 4.15 – Previsão do desgaste de flanco utilizando nas variáveis de entrada funções de pertinência trapezoidais, e nas variáveis de saída uma função de pertinência linear

Por último, foram realizadas previsões utilizando para as variáveis de entrada, funções de pertinência do tipo radial, e para as de saída função de pertinência constante (Figura 4.16) e linear (Figura 4.17).

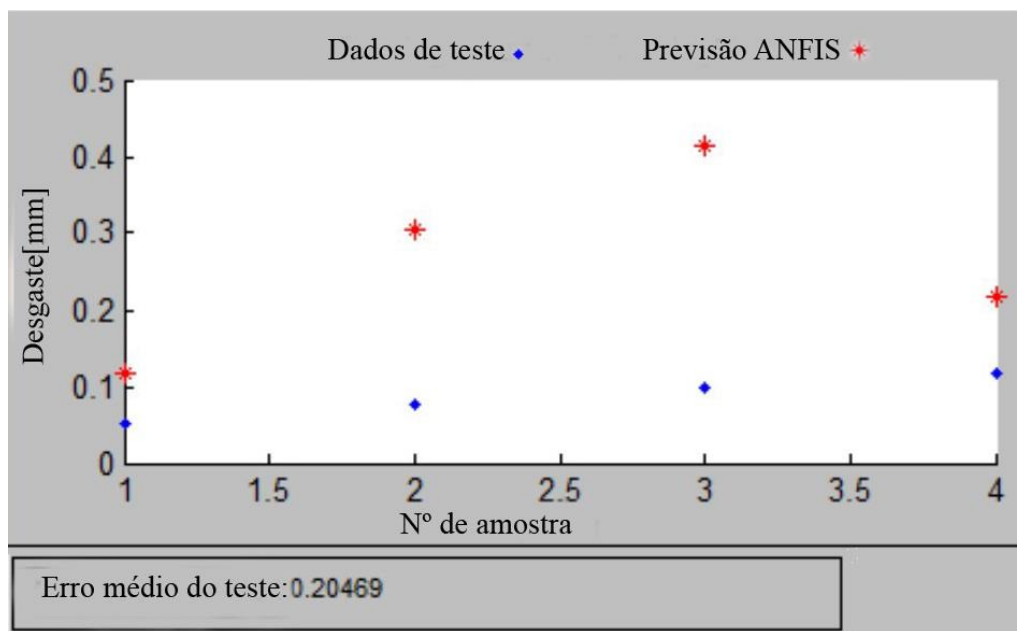


Figura 4.16 – Previsão do desgaste de flanco utilizando nas variáveis de entrada funções de pertinência radiais, e nas variáveis de saída uma função de pertinência constante

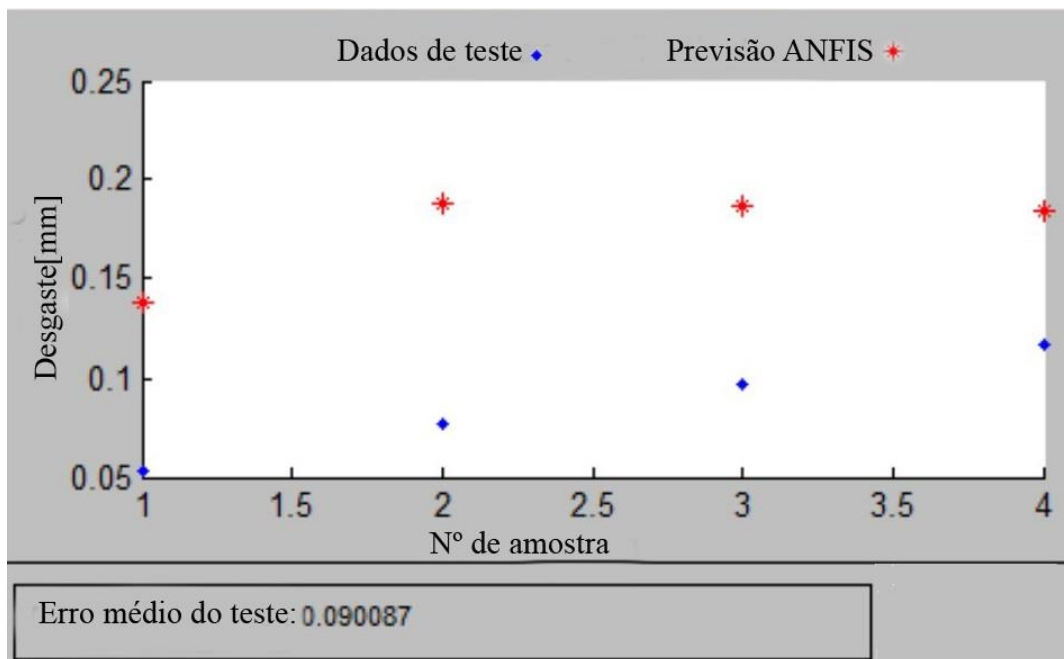


Figura 4.17 – Previsão do desgaste de flanco utilizando nas variáveis de entrada funções de pertinência radiais, e nas variáveis de saída uma função de pertinência linear

Na Tabela 4.3 expõe-se de forma resumida os resultados obtidos, para cada um dos tipos de função de pertinência.

Tabela 4.3 - Tabela comparativa entre os diferentes tipos de Função de Pertinência

Função de Pertinência de entrada	Função de pertinência de saída	Erro médio [mm]
Triangular	Constante	0.1219
Triangular	Linear	0.1093
Trapezoidal	Constante	0.0362
Trapezoidal	Linear	0.0371
Radial	Constante	0.2047
Radial	Linear	0.0901

Realizadas estas previsões, conclui-se que o tipo de funções de pertinência que melhor se adaptam às variáveis de entrada, registados no fenómeno, são as funções de pertinência trapezoidais registando valores de erro médio de 0.0362mm (constante) e 0.0371mm(linear).

Após a escolha do tipo de modelo e de funções de pertinência mais adequadas, para o fenómeno em estudo, realizou-se o mesmo procedimento para o desgaste de entalhe, utilizando nos valores de entrada somente funções de pertinência trapezoidais. Os parâmetros de entrada e de saída,

utilizados para o treino da rede, encontram-se indicados na Tabela 4.4, e os parâmetros de entrada e de saída, utilizados para testar a rede, encontram-se indicados na Tabela 4.5.

Tabela 4.4 - Variáveis de entrada utilizadas no treino da rede

Variáveis de treino			
Velocidade de Corte	Tempo	RMS	Desgaste médio
[m/min]	[s]	[m/s ²]	[mm]
120	300	0.9395	0.273
120	600	0.9479	0.360
120	900	1.0358	0.420
120	1200	1.1259	0.477
120	1500	1.0932	0.530
120	1800	1.0669	0.820
240	300	1.3893	0.423
240	600	1.3468	0.767
100	300	0.9718	0.207
100	600	0.9652	0.223
100	900	0.8485	0.250
100	1200	0.7787	0.290
100	1500	0.7513	0.350
200	300	1.0962	0.323
200	600	1.2511	0.580
200	900	1.2618	0.883
200	1200	1.2144	1.437
180	300	1.1924	0.297
180	600	0.9501	0.417
180	900	0.9880	0.523
160	300	1.3155	0.167
160	600	1.2668	0.193
160	900	1.1176	0.210
160	1200	1.0433	0.237

Tabela 4.5 - Variáveis de saída utilizadas para testar a rede

Variáveis de teste				
Número de Amostra	Velocidade de Corte [m/min]	Tempo [s]	RMS [m/s ²]	Desgaste médio [mm]
1	140	300	0.9718	0.120
2	140	600	0.9501	0.140
3	140	900	0.9880	0.177
4	140	1200	1.0218	0.213

O desgaste da ferramenta obtido experimentalmente e o desgaste previsto a partir do modelo ANFIS para várias combinações de velocidade de corte, tempo e valor de RMS, são mostradas no gráfico da Figura 4.18 (funções de pertinência constante) e da Figura 4.19 (funções de pertinência constante).

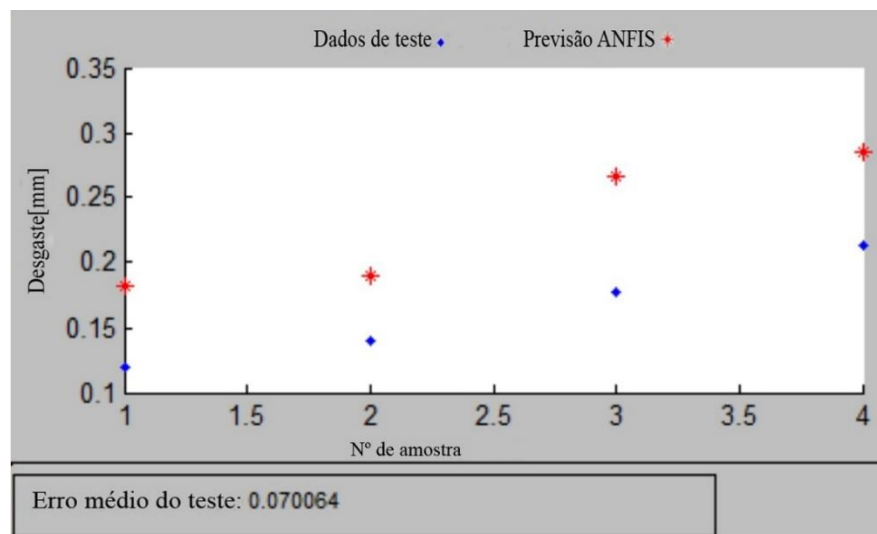


Figura 4.18 -Previsão do desgaste de entalhe utilizando nos valores de entrada funções de pertinência trapezoidais, e nos valores de saída uma função de pertinência constante

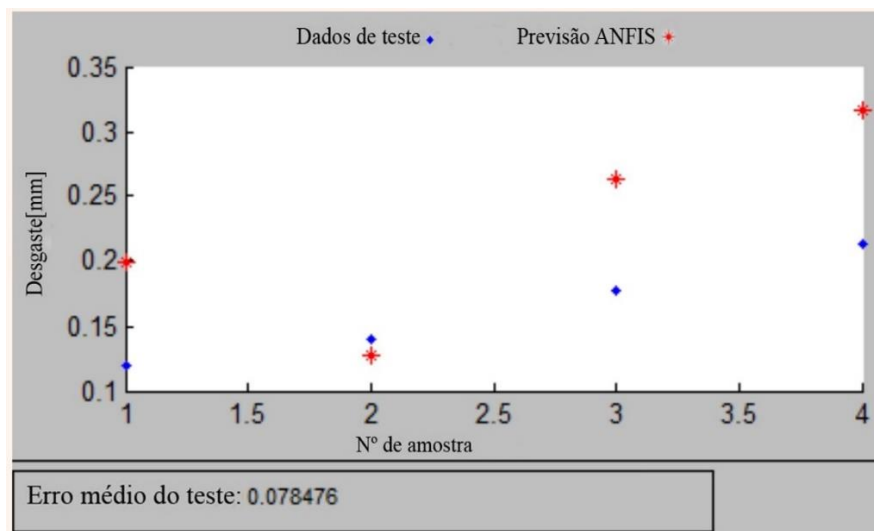


Figura 4.19 - Previsão do desgaste de entalhe utilizando nos valores de entrada funções de pertinência trapezoidais, e nos valores de saída uma função de pertinência linear

Na função de pertinência constante foi obtido um erro médio a rondar os 0.07mm, por outro lado, no caso da linear foi obtido um erro médio ligeiramente superior (cerca de 0.08mm). Embora o erro médio seja maior no caso do desgaste de entalhe do que no desgaste de flanco, os resultados foram satisfatórios, tendo em conta que o desgaste de entalhe é um fenómeno mais “aleatório” comparativamente ao desgaste de flanco.

4.5 Conclusão sobre a previsão do desgaste da ferramenta

Neste trabalho, em alternativa à determinação do desgaste da ferramenta recorrendo à observação do gume por intermédio de uma lupa foi apresentada uma solução menos dispendiosa e mais rápida para obter o desgaste da ferramenta. Para o efeito foi necessário utilizar um acelerómetro, uma placa de aquisição e duas ferramentas computacionais. O modelo ANFIS utilizado é composto por três entradas e uma saída. Os dois casos de estudo passam por efetuar uma previsão do desgaste de flanco e do desgaste de entalhe, onde se utilizou 80% dos dados para treino da rede e 20% para teste da rede obtendo resultados promissores.

As atuais limitações deste modelo estão ligadas ao facto de apenas ser possível obter previsões para os testes experimentais efetivamente realizados, pois é necessário um valor de RMS nas variáveis de entrada e este não pode ser obtido sem a aquisição do sinal de vibração, e por isso sem efetuar experimentalmente a operação de maquinagem.

Em suma, o modelo ANFIS apresentado para a previsão do desgaste da ferramenta de corte, utilizando valores de aceleração obtidos através dos sinais de vibração, foi validado com uma média de erro estimada de 0.0362mm no caso do desgaste de flanco e 0.07mm no caso do desgaste de entalhe. Estes resultados são promissores na perspetiva de que é possível ter uma perceção do desgaste que a ferramenta sem a necessidade de o avaliar diretamente.

Capítulo 5

Fabrico de um Produto Através de um Molde de Compactação de Cortiça

5.1 Introdução

Conforme explicado no capítulo introdutório, os alunos que se encontram a desenvolver trabalhos no Laboratório de Fabrico Assistido por Computador do DEM/ISEC, colaboram em múltiplas atividades nas quais o laboratório está envolvido. Desta forma, o aluno adquire uma experiência mais abrangente que, além de ser diretamente útil no trabalho que está a desenvolver, é vantajosa para uma formação prática pessoal mais abrangente.

Assim, paralelamente ao tema principal desenvolvido no trabalho de projeto, o qual incidiu na avaliação e previsão do desgaste da ferramenta no corte do aço inox duplex, foram desenvolvidos também outros trabalhos, entre os quais o apresentado neste capítulo, o qual diz respeito ao Projecto CatCork.

A participação no Projeto CatCork visa desenvolver um molde para compactação de uma mistura de granulado de cortiça e otimizar a formulação da mistura, nomeadamente em termos de pressão, temperatura de moldação e temperatura de cura. Como exemplo de partida para uma possível implementação industrial e comercial posterior, foi escolhido um brinquedo de divertimento para gato, cuja geometria inicialmente proposta é apresentada na Figura 5.1.



Figura 5.1 - Geometria proposta: a) Vista isométrica; b) Vista frontal; c) Vista lateral

5.2 Características da cortiça

A cortiça é um material cujas aplicações são conhecidas desde a Antiguidade, sendo utilizada como material flutuante, como vedante, entre outras características, cujo mercado, a partir do início do século XX, teve uma enorme expansão. A cortiça constitui o revestimento do tronco e ramos de um sobreiro. Macroscopicamente, é um material leve, elástico e praticamente impermeável a líquidos e gases, isolante térmico e elétrico e absorvedor acústico, sendo também inócuo e praticamente imputrescível, apresentando a capacidade de ser comprimido sem expansão lateral. Microscopicamente, a cortiça é constituída por camadas de células de aspeto alveolar, cujas membranas celulares possuem um certo grau de impermeabilização e estão cheias de um gás semelhante ao ar, que ocupa cerca de 90 por cento do volume.

Este material possui uma massa volúmica média de cerca de 200 kg/m^3 , e uma baixa condutividade térmica. A cortiça possui ainda uma notável estabilidade química e biológica e uma boa resistência ao fogo (Gil, 2012).

5.3 Processo de moldagem

Quando a cortiça é comprimida, as suas células encurvam e dobram, não lhe conferindo praticamente qualquer expansão lateral, havendo uma posterior recuperação, se retirada a carga. Além disso a cortiça é também um material que dissipa a energia de deformação.

Os granulados são obtidos através da ação de moinhos de estrelas ou de dentes, moinhos de martelos e moinhos de facas. Na sequência do processamento da cortiça e a partir dos granulados (usualmente 2 a 6 mm), temos a produção dos aglomerados compostos de cortiça, que resultam de um processo de aglutinação dos grânulos por ação conjunta da pressão, temperatura e um agente de aglutinação. Por exemplo, para fins decorativos são usados granulados de calibre fino-médio (Gil, 2012).

No fabrico deste tipo de aglomerados, como elemento de adesão ao granulado, usam-se fundamentalmente resinas sintéticas de poliuretano, fenólicas (fenol-formaldeído) e melamínicas. Por vezes são também utilizadas resinas de origem vegetal, havendo já ligantes à base de enzimas. A quantidade exata de mistura a utilizar é medida e colocada em moldes, usualmente metálicos, após o que são colocadas as tampas, do mesmo material e se efetua uma prensagem, trancando o aglomerado sob uma determinada força de compressão (Gil, 2012).

De acordo com o código internacional das práticas rolheiras a aglutinação do granulado deve ser feita a quente, com aglutinantes e aditivos. Deve-se também garantir a completa polimerização da cola, devendo a mistura aglomerada conter pelo menos 75%, da sua massa total, de granulados de cortiça tratada (European Cork Federation, 2017).

Os moldes contendo a mistura prensada são colocados nas estufas de “cura” (polimerização dos aglutinantes). As estufas de “cura” podem ser fornos de aquecimento ou sistemas de hiperfrequência. São utilizadas temperaturas entre os 110 e 150°C, com um período de duração que pode ir até 22 horas. Estes dois parâmetros devem ser suficientes para se dar a

polimerização das colas. Após a “cura”, efetua-se a desmoldagem utilizando um agente desmoldante (Gil, 2012).

5.4 Trabalho a realizar

Atendendo que a proposta de geometria inicial levantava diversas dificuldades na sua obtenção por compactação do granulado e posterior desmoldagem, em primeiro lugar a geometria foi ligeiramente ajustada, sem desvirtuar a ideia inicial do brinquedo ser semelhante a uma abelha, de modo a facilitar o processo de desmoldagem após compactação. As alterações incidiram nos olhos e boca da abelha, resultando a geometria apresentada na Figura 5.2. Seguidamente, a partir deste modelo foi obtida a geometria do molde, dividido em 3 partes: duas partes laterais iguais (Figura 5.3), e de um êmbolo superior desenhado com a face da abelha (Figura 5.5 c)).

O material utilizado no fabrico dos componentes foi a liga de alumínio 7075-O, a qual contém 86 a 91% de alumínio, 5 a 6% de zinco, 2 a 3% de magnésio, 1.2 a 2% de cobre e quantidades inferior a 0.5% de outros materiais.

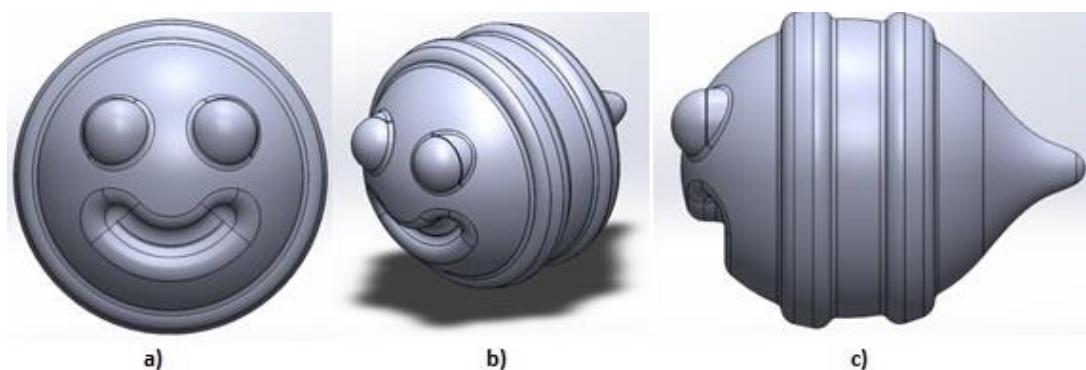


Figura 5.2 - Desenho da peça resultante do molde: a) Vista frontal; b) Vista em perspetiva isométrica; c) Vista Lateral

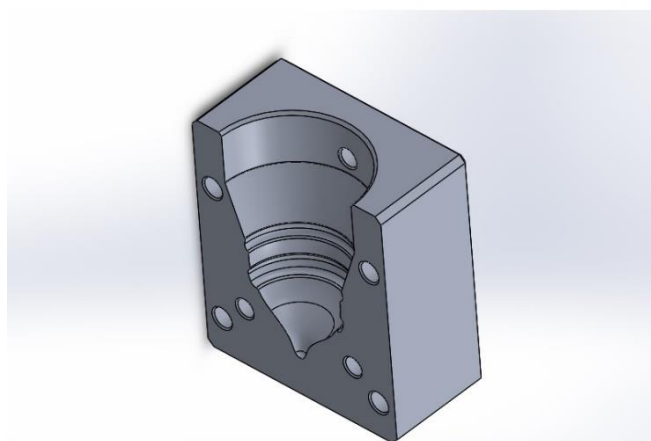


Figura 5.3 – Desenho inicial da parte lateral do molde

Atendendo ao que foi referido acima, foram realizadas alterações no desenho inicial de modo a viabilizar o processo. De uma forma geral, o objetivo deste trabalho passa por tornar o processo de moldagem deste brinquedo viável, realizando as alterações necessárias. Outro dos objetivos é testar o processo de moldagem e otimizar o mesmo.

5.5 Projeto, fabrico e funcionamento do molde de compactação

Partindo da geometria inicial idealizada para o molde, de modo a tornar o processo de moldagem viável foi necessário garantir determinados requisitos funcionais tais como:

- Um sistema de enchimento que consiga alocar o volume necessário de cortiça e aglomerado;
- Um sistema de fixação para garantir a ligação entre o sistema de enchimento e o molde;
- O molde possuir uma geometria que garanta que o material não fique retido em zonas indesejáveis ao ser comprimido;
- Um correto alinhamento das partes que constituem o molde;
- Um sistema que garanta uma posição correta do êmbolo de enchimento no final da compactação.

5.5.1 Geometria e componentes do molde

Atendendo que previsivelmente a geometria inicial do molde iria levantar problemas de retenção de material em locais indesejáveis, dificultando o processo de prensagem, houve necessidade de realizar algumas alterações geométricas nas 2 partes laterais do molde, as quais já tinham sido fabricadas. Deste modo foi removido material na parte superior do molde, tal como mostra a Figura 5.4.

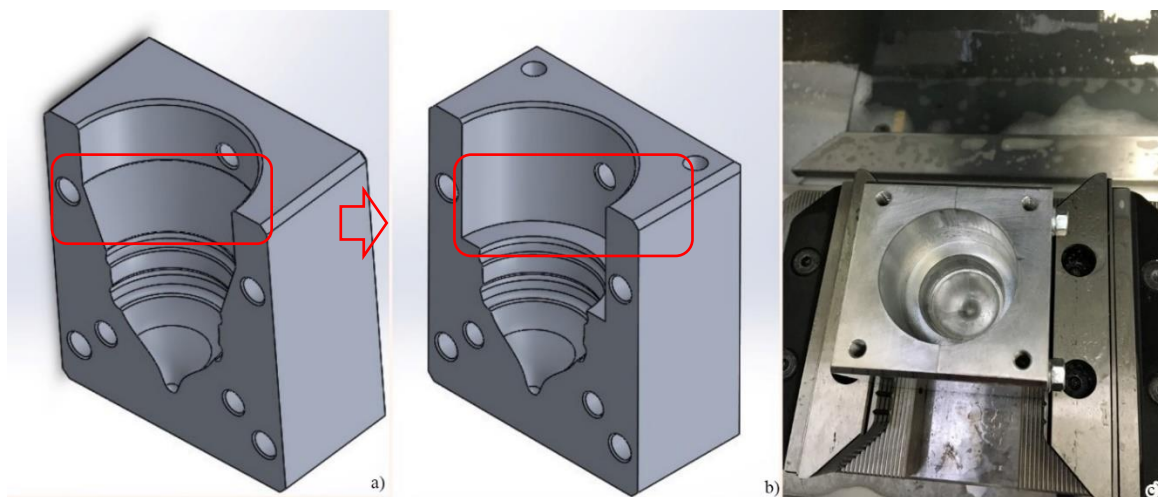


Figura 5.4 - Alterações efetuadas no molde: a) Geometria inicial; b) Geometria Final; c) Geometria após a maquinação

Realizadas estas alterações, foi necessário efetuar modificações de modo a compensar esta remoção de material no molde. Para este efeito reduziu-se o diâmetro do êmbolo e fabricou-se um casquilho, visível na Figura 5.5.

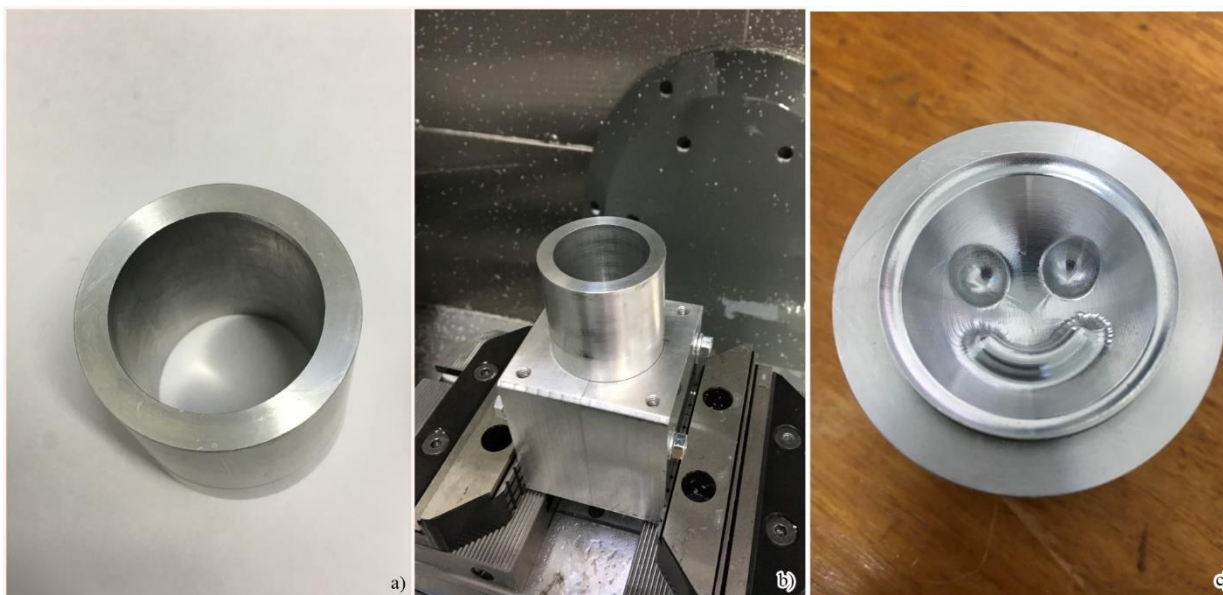


Figura 5.5 - a) Casquilho fabricado; b) Montagem do casquilho sob duas partes laterais do molde; c) Êmbolo que faz a compactação do aglomerado e que se desloca no interior do casquilho

5.5.2 Alinhamento do molde

Visando obter um alinhamento do molde foram feitos 4 furos no molde, nos quais foram inseridos 4 varões roscados, apertados com porcas em ambas as extremidades de modo a garantir que não há expansão lateral do molde (Figura 5.6).



Figura 5.6 - Alinhamento do molde: a) Molde montado; b) Molde aberto; c) Varão roscado; d) Furos realizados; e) Varões roscados inseridos no molde

5.5.3. Sistema de Enchimento

Com o objetivo de criar um sistema de enchimento, no qual o êmbolo comprima a mistura, fabricou-se uma peça com um canal cilíndrico, com altura corresponde à quantidade de granulado necessária para a produção do brinquedo no molde.

Na Figura 5.7 estão representados os volumes da peça tomados em consideração na realização dos cálculos da altura necessária do sistema de enchimento. Para o efeito, em primeiro lugar foi calculado o volume total da peça (Figura 5.7 a)), sendo depois calculado o volume da peça sem considerar o êmbolo que comprime o granulado de cortiça e que contém o molde com a face.

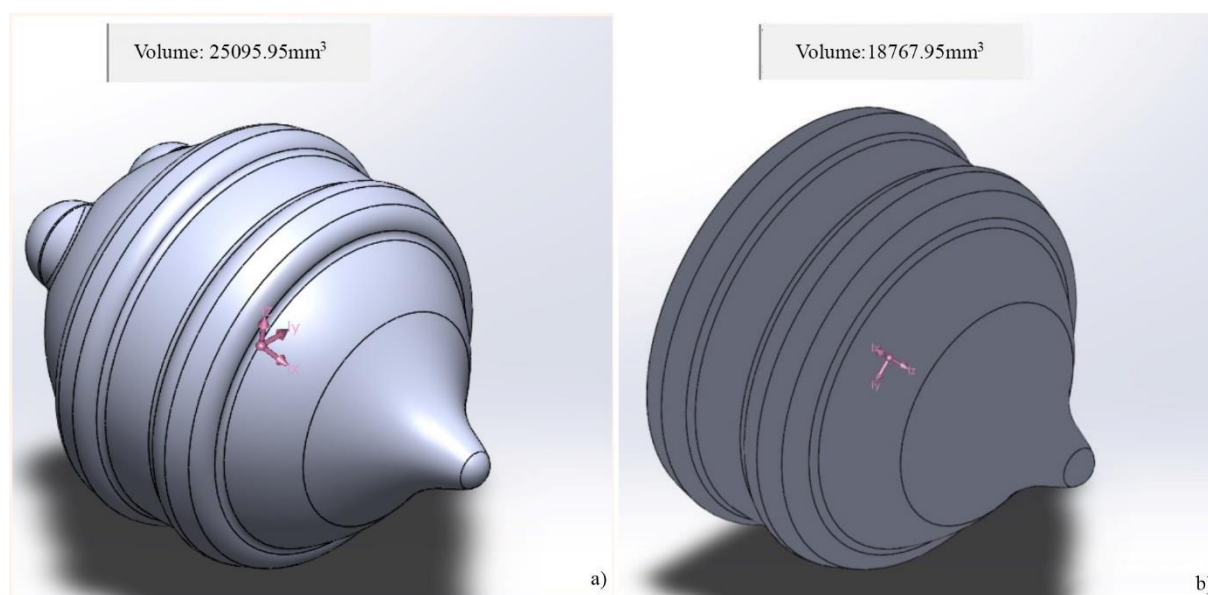


Figura 5.7 - a) Volume da peça (incluindo a face); b) Volume da peça (excluindo a face)

Sabendo que a cortiça tem uma grande capacidade compressão, cerca de 85%, o que significa que o canal cilíndrico deve ter uma altura considerável, cujo volume exigido foi calculado da seguinte forma:

$$V_{peça} = 25095.95mm^3$$

$$V_{face} = 6328.81mm^3$$

Aplicando um grau de compressibilidade de 85% temos:

$$V_{peça} = V_{cortiça} * 0.15$$

$$\Leftrightarrow V_{cortiça} = 167306.33mm^3$$

Ou seja, antes da peça estar sob a forma compactada, o volume de granulado de cortiça necessário será cerca de 167306.33 mm³

Tendo em consideração que será necessário dispor inicialmente de um volume de 167306,33 mm³ de granulado de cortiça para alimentar o molde e efetuar a compactação, este volume estará disponível dentro do molde, juntamente com uma cavidade cilíndrica acoplada ao molde, e que acomodará inicialmente o restante material granulado.

Sendo assim, o volume necessário do canal cilíndrico será calculado da seguinte forma:

$$V_{cilindro} = V_{cortiça} - (V_{peça} - V_{face})$$

$$V_{cilindro} = 148539.19 \text{ mm}^3$$

Sabendo que o canal cilíndrico terá obrigatoriamente o diâmetro de entrada do molde (36 mm), a altura do canal cilíndrico será calculada do seguinte modo:

$$A_{base\ cil.} = \pi * r^2 = \pi * 18^2 = 1017.88 \text{ mm}^2$$

$$V_{cilindro} = A_{base\ cil.} * h$$

$$\Leftrightarrow h = \frac{V_{cilindro}}{A_{base\ cil.}} = 145,92 \text{ mm}$$

A ligação do sistema de enchimento com a parte superior do molde foi feita por intermédio de quatro parafusos de fixação, tal como mostra a Figura 5.8.

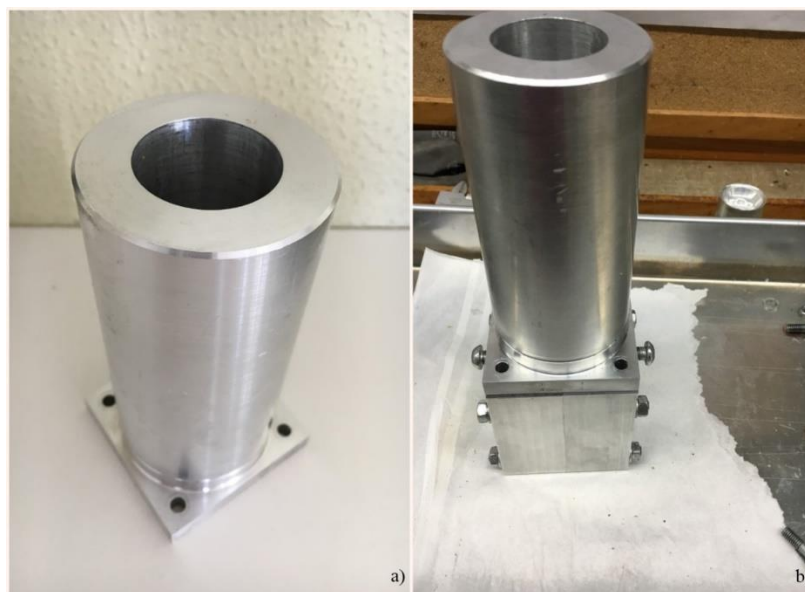


Figura 5.8 - Sistema de enchimento do molde: a) Peça fabricada; b) Sistema de enchimento montado

Para empurrar o êmbolo no interior do casquilho, de modo a comprimir o granulado de cortiça dentro do molde, foi fabricada a haste apresentada na Figura 5.9.



Figura 5.9 - Haste fabricada, usada sob o êmbolo para compressão da mistura

5.5.4 Posição Final do Êmbolo de Compactação

Tendo em conta que ocorre uma redução de volume a rondar os 85% a uma temperatura de 110°C, após a compactação existe uma tendência de o material expandir ligeiramente, provocando um aumento de volume indesejado, caso este efeito não seja contrariado. De modo a impedir este fenómeno, surge a necessidade de criar um sistema que mantenha o êmbolo na mesma posição final após a compressão. Com este intuito, conforme se encontra representado na Figura 5.10, foi aberto um rasgo em toda a volta do êmbolo, de modo a aplicar dois parafusos que atravessem as partes laterais do molde e o casquilho e que mantenham a posição final do êmbolo, após compressão do granulado de cortiça.

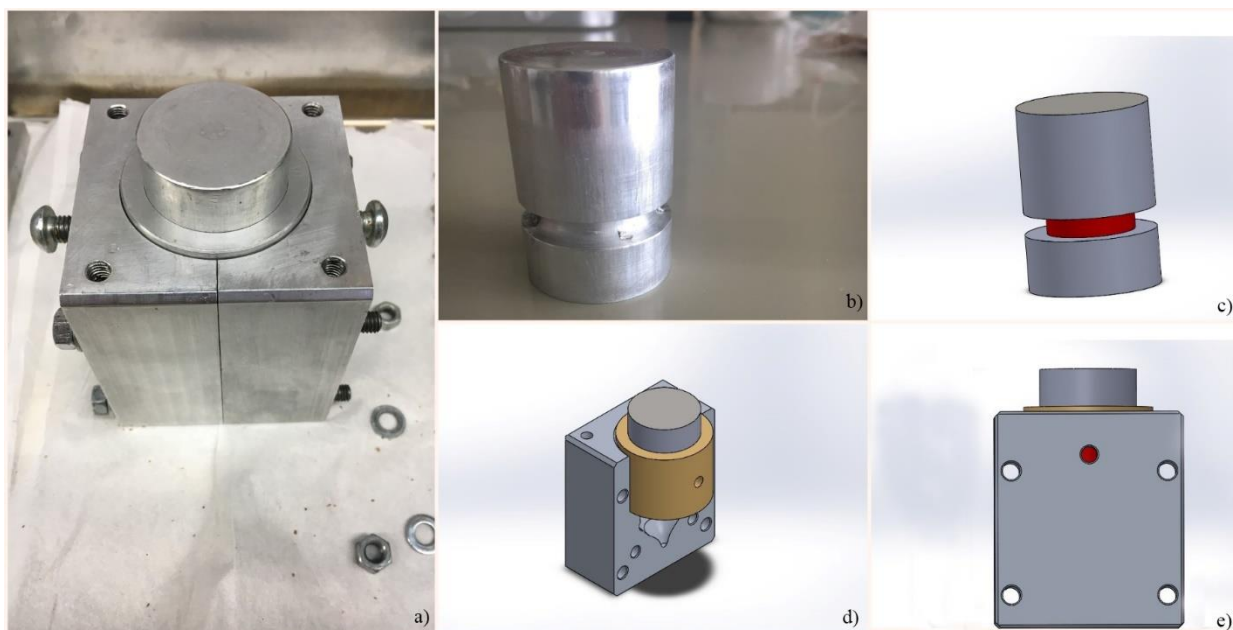


Figura 5.10 - a) Êmbolo alinhado na sua posição, com os parafusos apertados; b) Rasgo no êmbolo; c) Rasgo do êmbolo representado no SolidWorks (vermelho); d) Furo realizado no casquilho; e) Verificação do alinhamento do êmbolo na posição final de compactação

A Figura 5.11 mostra uma vista explodida dos diferentes componentes do molde, utilizados na compactação do granulado de cortiça, cuja legenda é a seguinte:

1. Sistema de enchimento do molde;
2. Casquilho de adaptação entre as partes laterais do molde e o êmbolo de compactação;
3. Êmbolo de compactação (parte superior do molde);
4. Partes laterais do molde.

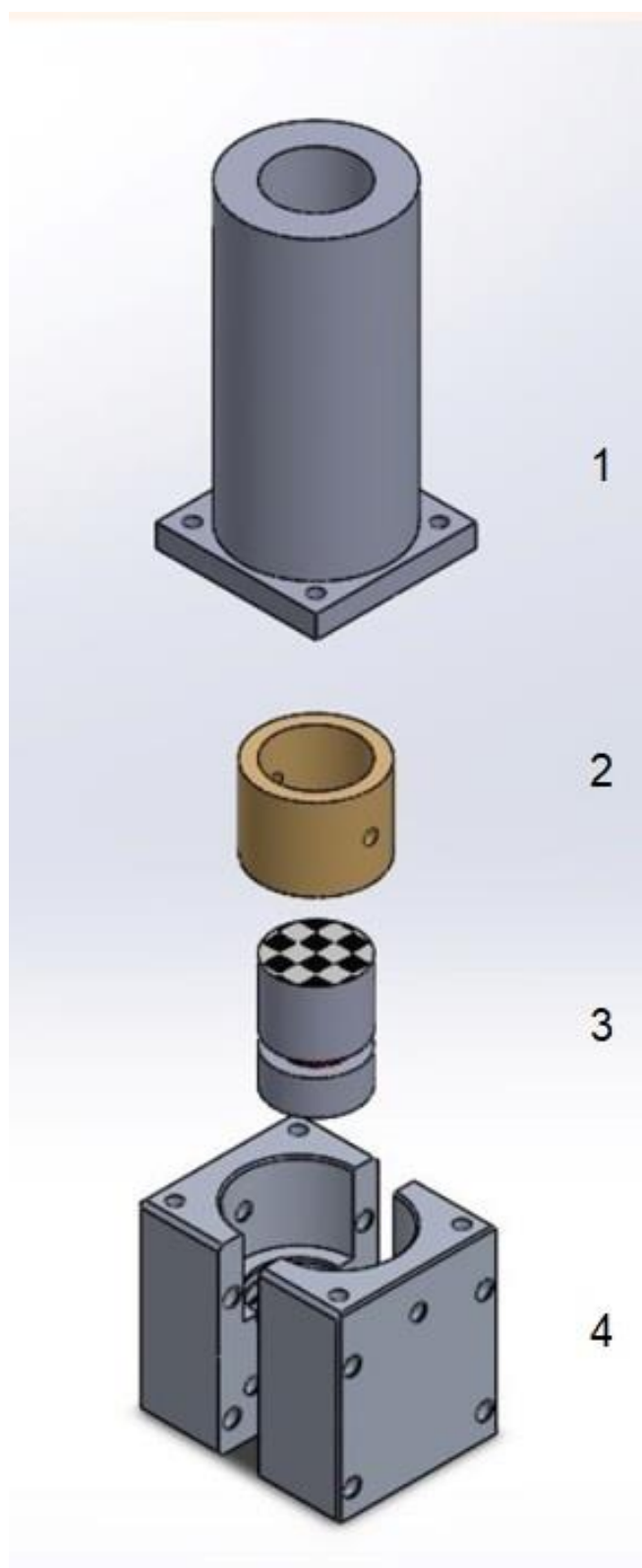


Figura 5.11 - Vis ta explodida do molde em perspectiva isométrica

5.6 Processo de compactação e cura da cortiça

5.6.1 Equipamento e materiais utilizados

Ao longo dos ensaios foi utilizado o seguinte material (Figura 5.12):

- Estufa de secagem da marca “Nahita”, modelo “631 Plus”, onde o molde se manteve a uma temperatura de 110°C durante o ensaio;
- Pó e granulado de cortiça, de várias granulometrias;
- Balança de precisão;
- Variado material de laboratório auxiliar. Desde proveta, vareta, entre outros;
- Cola FP240D e DBE utilizado na remoção da cola no final do ensaio;
- Agentes desmoldantes de modo a facilitar a remoção da peça do molde;
- Prensa hidráulica onde foi feita a compressão do material.



Figura 5.12 - Material utilizado nos ensaios: a) Estufa de secagem; b) Balança de precisão; c) Granulado e pó de Cortiça; d) Cola FP240D; e) Spray desmoldante OKS 1501; f) Funil; g) Gobelé; h) Proveta; i) Vareta de vidro

5.6.2 Etapas do processo de compactação da cortiça

As etapas de preparação do ensaio encontram-se apresentados na Figura 5.13, tendo sido as seguintes:

- Primeiramente foi aplicado o agente desmoldante nas superfícies que entram em contacto com a cola, ou que poderão entrar contacto, como se pode ver na Figura 5.13 a);
- De seguida procedeu-se à montagem do molde (Figura 5.13 b) Figura 5.13 c));
- Após a montagem do molde, colocou-se no provete volumétrico, a quantidade de cortiça necessária para o ensaio a realizar (Figura 5.13 d)). Antes de se colocar a cortiça no recipiente de mistura, foi determinada a massa do recipiente vazio (Figura 5.13 e)) e de seguida determinou-se a massa do recipiente com a cortiça, efetuando-se o mesmo procedimento para a quantidade necessária de cola;
- Na etapa seguinte, misturou-se bem a cola com o pó/granulado de cortiça utilizando uma vareta de vidro (Figura 5.13 f)), montou-se o sistema de enchimento e colocou-se a mistura no molde;
- Após o enchimento do molde, foi colocado o êmbolo na parte na parte superior do sistema de enchimento (Figura 5.13 g));
- De seguida, a haste foi inserida no sistema de enchimento para manualmente empurrar o êmbolo que vai comprimir o aglomerado (Figura 5.13 h));
- Por fim, recorrendo a uma prensa hidráulica, a mistura sofreu uma compressão adicional, de modo que o êmbolo atingisse a posição final (Figura 5.13 i)). Apertaram-se os parafusos que fixam o êmbolo ao molde e removeu-se o sistema de enchimento (Figura 5.13 j)).

Neste momento o molde encontra-se em condições de ser colocado na estufa e de se realizar o processo de cura.



Figura 5.13- Procedimento Experimental de enchimento e compactação do granulado de cortiça no molde: a) Aplicação do desmoldante; b) e c) Montagem do molde; d) Componentes da mistura; e) Determinação da massa; f) Homogeneização da mistura; g) Inserção do êmbolo; h) Inserção da haste sobre o êmbolo; i) Prensagem hidráulica até o êmbolo atingir a posição final; j) Molde pronto para ser levado à estufa de secagem

5.6.3 Processo de cura e desmoldagem

Nesta fase o molde foi levado à estufa para fazer a “cura” onde a cola misturada no aglomerado polimeriza, garantido que quando se efetuar a desmoldagem a peça não sofre aumento de volume.

Na Figura 5.14 a),   possível visualizar o molde colocado na estufa a uma temperatura de 110 C, tendo em vista a polimerização do agente aglutinante. Na Figura 5.14 b), pode-se ver a abertura do molde após o tempo de “cura” na estufa. Por fim, na Figura 5.14 c), encontra-se o êmbolo do molde, no qual é visível a face da abelha e o resultado obtido com o aglomerado de cortiça.

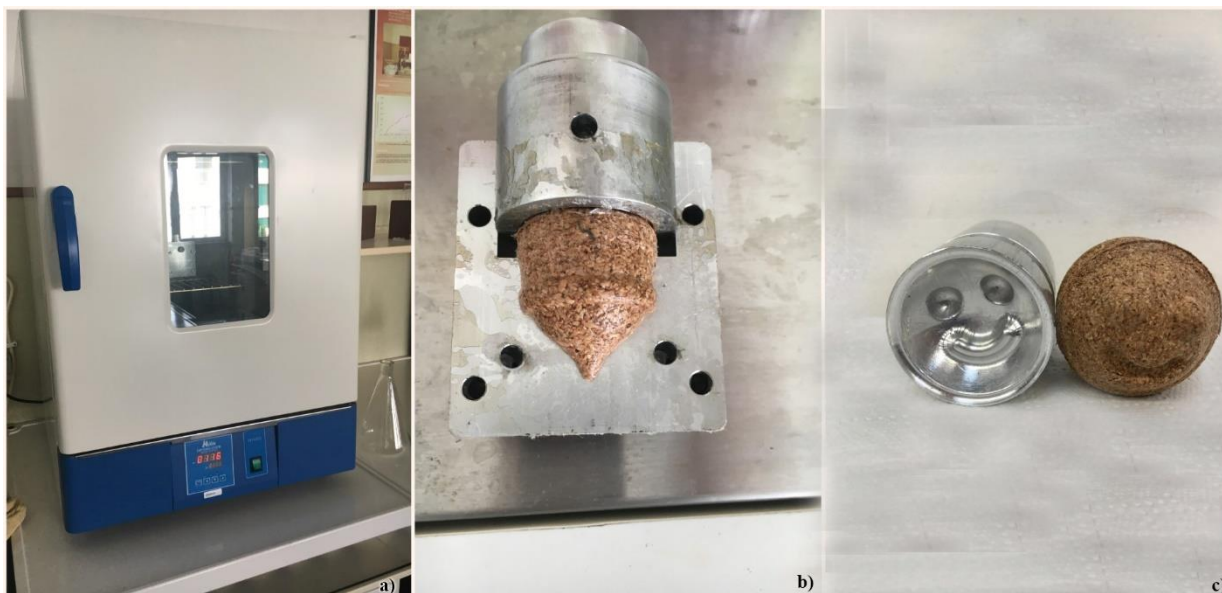


Figura 5.14 - Realização do ensaio: a) Molde na estufa de secagem; b) Abertura do molde; c) Molde da face no êmbolo e resultado obtido

5.7 Influência da granulometria da cortiça

Numa primeira fase, o estudo da granulometria foi realizado com quatro tipos diferentes de granulado (Tabela 5.1), sendo um deles pó de cortiça. Após cada ensaio foi-se reduzindo o tempo de estufa, tendo em vista otimizar o processo.

O ensaio 4 foi realizado com pó de cortiça tendo em vista tentar obter uma solução mais ecológica, visto que o pó de cortiça é obtido através de restos de outras aplicações de cortiça, sendo um desperdício na cadeia de fabrico.

À medida que se foram realizando os ensaios, verificou-se que o tempo de cura podia ser perfeitamente reduzido, uma vez que a cola tinha atingido plenamente a cura. Por esse motivo, o tempo de cura do ensaio 1 foi de 5h, tendo sido sucessivamente reduzido até às 3h e 30 min.

Tabela 5.1 - Ensaio realizados para o estudo da granulometria

Ensaio	Granulado [mm]	Tempo de Cura [hh:mm]	Massa da cola [%]	Desmoldante
1	1 a 2	05:00	33,20	Spray
2	0,5 a 1	04:00	34,23	Spray
3	2 a 3	03:30	37,79	Spray
4	Pó	03:30	31,23	Spray

Após a realização destes quatro ensaios, conforme podemos ver na Figura 5.15, o granulado de calibre 0.5 a 1mm (peça **a**)), a peça apresenta uma melhor definição dos pormenores da face da abelha relativamente aos granulados de calibre 1 a 2mm (peça **b**)) e 2 a 3mm (peça **c**)). Por outro lado, no ensaio 4 (peça **d**)), onde se utilizou pó de cortiça, apesar de ser o ensaio em que os pormenores ficaram melhor definidos, a peça acabou por fraturar no processo de desmoldagem. Note-se que ao realizar a mistura do pó com a cola, não foi possível criar uma mistura tão homogénea como nos ensaios anteriores, sendo esta uma possível causa para a fratura no processo de desmoldagem.



Figura 5.15 - Estudo da Granulometria: a) Ensaio 2; b) Ensaio 1; c) Ensaio 3; d) Ensaio 4

Deste modo conclui-se que o tipo de granulado com melhores resultados obtidos foi o granulado de calibre 0,5 a 1mm (peça **a**)), o qual foi selecionado para posteriormente ser utilizado na otimização do processo.

5.8 Otimização do processo

Após a realização do estudo da granulometria e ter sido selecionado o calibre padrão para os ensaios posteriores, nesta fase objetivo é otimizar o processo no que diz respeito à percentagem da massa de cola a utilizar e ao tempo de cura em estufa. Estes ensaios foram conduzidos utilizando dois tipos de desmoldante: spray e cera.

A Tabela 5.2 apresenta os ensaios realizados.

Tabela 5.2 - Ensaio realizados para otimização do processo utilizando spray desmoldante

Ensaio	Granulado [mm]	Tempo [hh:mm]	Massa da cola [%]	Desmoldante
5	0,5 a 1	03:00	24,82	Spray
6	0,5 a 1	02:30	15,57	Spray
7	0,5 a 1 + ervas	02:30	25,48	Spray
8	Pó	02:30	33,13	Spray
9	0,5 a 1	02:00	15,62	Spray
10	0,5 a 1	01:30	12,35	Spray
11	0,5 a 1	01:00	13,72	Spray

Inicialmente foram realizados os ensaios 5 e 6, onde se reduziu os tempos de cura em 30 minutos e 1 hora, relativamente ao ensaio 4. Quanto às percentagens de massa de cola a utilizar, definiu-se uma quantidade a rondar os 25% para o ensaio 5 e 15% para o ensaio 6.

Após a realização do ensaio 5, tal como mostra a Figura 5.16 (peça **a**)), onde se obtiveram resultados positivos, encontram-se cumpridas as normas de aglomeração da prática rolheira. No entanto, neste ensaio tal como nos anteriores, parte da cola fluiu para fora da zona da peça no molde, tal como se pode ver no ponto **b**) da Figura 5.14, significando que a quantidade de cola se encontra em excesso.

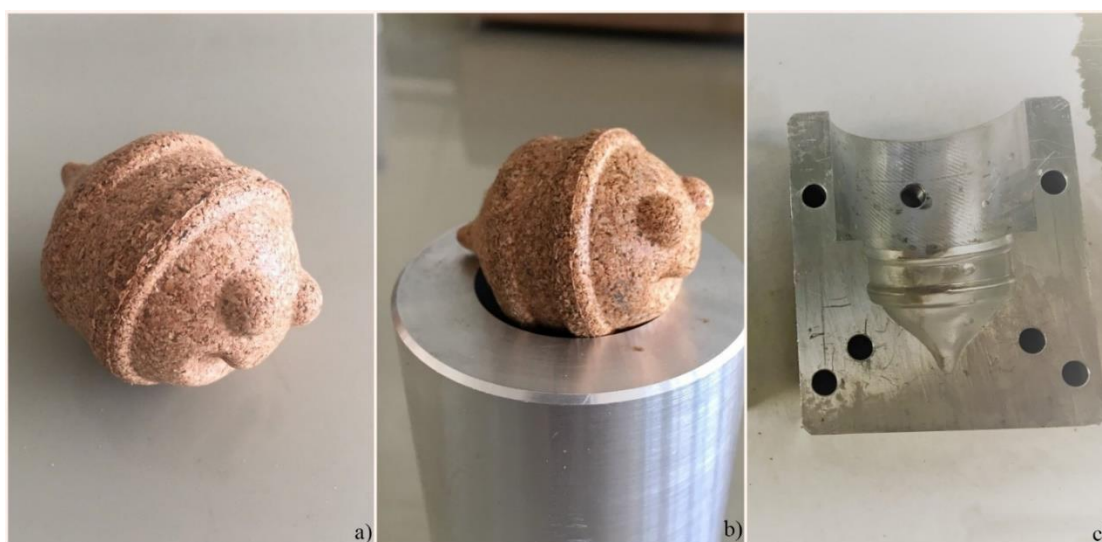


Figura 5.16 - a) Resultado no ensaio 5; b) Resultado obtido no 6; c) Resíduos de cola no molde

Perante a experiência obtida, no ensaio 6 reduziu-se a quantidade de cola e também o tempo de “cura”, obtendo resultados positivos no que diz respeito à peça obtida e definição dos seus pormenores como se pode ver pela peça **b**) da Figura 5.16. Quanto à quantidade de cola verifica-

se uma redução do fluxo para fora da zona da peça no molde (Figura 5.14 c)). Desta forma reduziu-se a quantidade de cola em excesso sem comprometer o resultado final da peça.

Seguidamente, no ensaio 7 testou-se a possibilidade de adicionar à mistura ervas aromáticas de lavanda, com uma percentagem de massa de cola a rondar os 25% e a percentagem de ervas a rondar os 35%.

Como se pode verificar na Figura 5.17 os resultados obtidos foram positivos, os pormenores da geometria da peça ficaram igualmente bem definidos. Quanto à libertação do aroma a lavanda, os resultados obtidos também foram positivos.

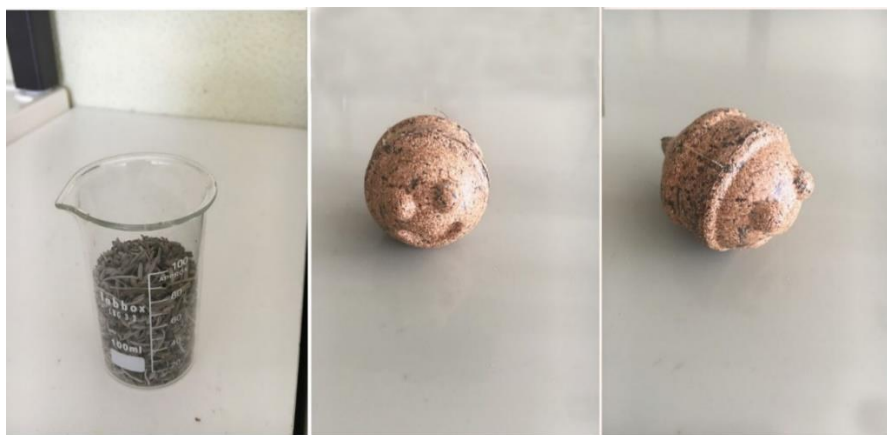


Figura 5.17 - Ervas de lavanda utilizadas (esquerda) e resultados obtidos no ensaio 7

No ensaio 8 tentou-se novamente realizar um ensaio com pó de cortiça, utilizando um método diferente para efetuar a mistura da cola com o pó, garantindo que a mistura seja realizada de forma mais homogénea. Neste ensaio utilizou-se uma percentagem de massa de cola a rondar os 33%.

Os resultados obtidos, tal como indica a Figura 5.18, foram negativos pois a peça voltou a fraturar no processo de desmoldagem. Desta forma, devido aos resultados obtidos considerou-se a utilização do pó de cortiça como um processo inviável.



Figura 5.18 - Resultados obtidos no ensaio 8

Por fim realizaram-se três ensaios com objetivo de reduzir o tempo de “cura”, utilizando uma percentagem de cola a inferior a 15%, cujo resultado é ilustrado na Figura 5.19.

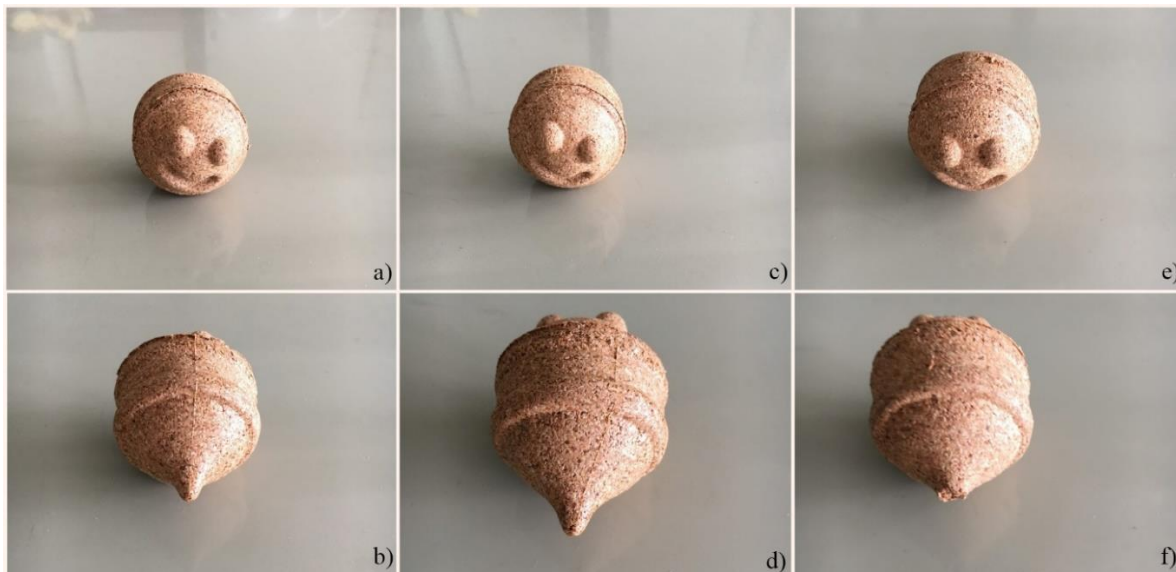


Figura 5.19 - Resultados obtidos: a) Ensaio 9 (vista frontal); b) Ensaio 9 (Vista Traseira); c) Ensaio 10 (Vista Frontal); d) Ensaio 10 (Vista Traseira); e) Ensaio 11 (Vista Frontal); f) Ensaio 11 (Vista Traseira)

Como se pode ver na Figura 5.19, nos ensaios 9 (a) e b)) e 10 (c) e d)), com a duração de 2 horas e 1 hora e 30 minutos respetivamente, os resultados obtidos foram bastante positivos. No entanto, no ensaio 11 (e) e f)), com a duração de 1 hora, aquando da realização do processo de desmoldagem ocorreu uma fratura na zona da cauda da abelha como se pode ver na figura(f)).

Nos ensaios seguintes foi decidido utilizar percentagens de massa de cola inferiores a 15%. Além disso, em virtude do spray desmoldante ter terminado e não sendo possível a sua imediata aquisição, passou-se a utilizar uma cera desmoldante com princípio de funcionamento semelhante (Figura 5.20).



Figura 5.20 - Cera desmoldante

Tendo sido alterado o agente desmoldante foram repetidos os tempos de ensaio, dos dois últimos ensaios realizados com o spray desmoldante. Foram realizados os seguintes ensaios (Tabela 5.3):

Tabela 5.3 - Ensaio realizados para otimização do processo utilizando cera desmoldante

Ensaio	Granulado [mm]	Tempo [hh:mm]	Massa da Cola [%]	Desmoldante
12	0,5 a 1	01:30	13,75	Cera
13	0,5 a 1	01:00	13,27	Cera
14	0,5 a 1 + ervas	01:30	13,95	Cera
15	0,5 a 1 + ervas	01:00	14,07	Cera
16	0,5 a 1 + ervas moídas	01:00	13,43	Cera

Os ensaios 12 e 13, tiveram a duração de 1 hora e 30 minutos e 1 hora respetivamente, utilizando percentagens de massas de cola inferiores a 15%, sendo os resultados apresentados na Figura 5.21.



Figura 5.21 - Resultados obtidos: a) Ensaio 12 (Vista Frontal); b) Ensaio 12 (Vista Traseira); c) Ensaio 13 (Vista Frontal); d) Ensaio 13 (Vista Traseira)

Os resultados obtidos, foram positivos no ensaio 12 (a) e b)). Quanto ao ensaio 13 (c) e d)), comparativamente ao ensaio 11, onde ocorreu uma fratura na cauda da abelha, os resultados obtidos foram bastantes positivos tal como podemos ver na figura (d)), não tendo ocorrido fratura na zona da cauda.

Os ensaios 14 e 15 foram realizados com a duração de 1 hora e 30 minutos e 1 hora respetivamente, utilizando percentagens de massas de cola inferiores a 15%. A percentagem de massa de ervas utilizadas nos ensaios 14 e 15 foi cerca de 46% e 55% respetivamente. Os resultados são apresentados na Figura 5.22.



Figura 5.22 - Resultados obtidos: a) Ensaio 14 (Vista Frontal); b) Ensaio 14 (Vista Traseira); c) Ensaio 15 (Vista Frontal); d) Ensaio 15 (Vista Traseira)

Relativamente ao ensaio 14, tal como mostra a Figura 5.22 **(a e b)**), os resultados obtidos foram bastante positivos, tendo em conta que foi utilizada uma percentagem de massa de cortiça de cerca de 39%. Os pormenores da peça ficaram bem definidos, e a libertação do aroma a lavanda também obteve os resultados desejados. Por outro lado, no ensaio 15 **(c e d)**), onde se utilizou uma maior percentagem de massa de ervas (cerca de 55%) e uma menor quantidade de cortiça (31%), ocorreu uma fratura na zona da cauda durante a desmoldagem.

Por último, no ensaio 16 foram trituradas as ervas aromáticas, como se pode ver na Figura 5.23 **(a e b)**), com o intuito de conseguir uma mistura mais homogénea e verificar se ocorre ou não a fratura na zona da cauda. Neste ensaio foram utilizadas aproximadamente as mesmas quantidades de cortiça, ervas aromáticas e cola.

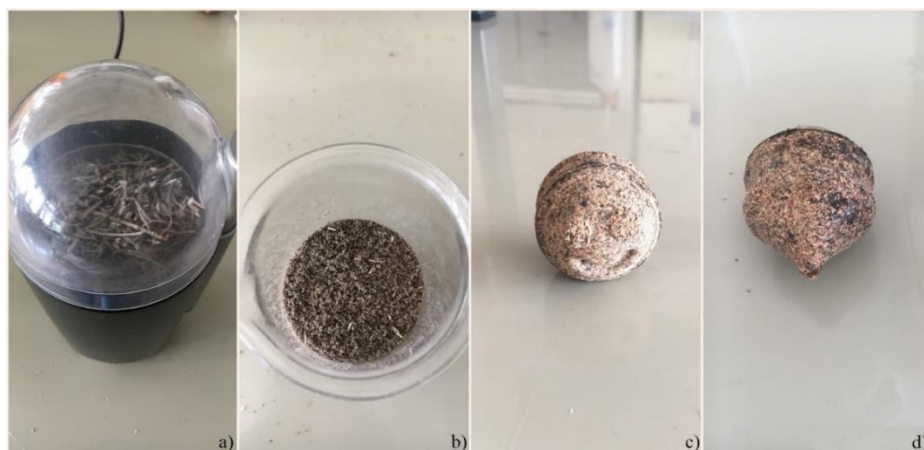


Figura 5.23 - a) Trituração das ervas de lavanda; b) Ervas trituradas; c) Resultados do ensaio 16 (Vista Frontal); Resultados do ensaio 16 (Vista Traseira)

Tendo em conta o objetivo deste ensaio, os resultados obtidos não foram satisfatórios, ocorrendo de igual modo a fratura na zona da cauda, tal como se pode ver na Figura 5.23 **(c e d)**). Além disso, o aspeto visual obtido piorou comparativamente ao ensaio anterior.

5.9 Conclusões

O principal objetivo relativo a este capítulo foi cumprido, o qual passou por viabilizar o processo compactação de cortiça, numa geometria complexa.

O molde concebido é composto por um conjunto de componentes, cada um com uma função importante na realização do processo de compactação da cortiça, tendo desempenhado plenamente a função para a qual foi projetado. É de salientar que as alterações, nomeadamente, na geometria do molde, tal como, na geometria do êmbolo permitiram uma maior precisão, nos resultados obtidos. Esta precisão garantiu que a totalidade do material fosse compactado e que a posição do êmbolo se mantivesse inalterada durante a realização da “cura”.

Em termos de otimização do processo, foram obtidos bons resultados nas seguintes condições:

- Spray desmoldante;
- Cera desmoldante;
- Percentagens de cola inferiores a 15%;
- Tempos de “cura” inferiores a 2 horas, 1 hora e 30 minutos no caso do spray e, 1 hora utilizando cera desmoldante;
- Ervas aromáticas de lavanda, utilizando percentagens de cola inferiores a 15%.

As principais limitações do sistema estão relacionadas com fatores intrínsecos aos processos de remoção da cola, e de montagem do molde, onde se despende de uma elevada quantidade tempo. Relativamente à remoção da cola é necessário aplicar DBE, de modo a facilitar a sua remoção e de seguida é necessário lavar os componentes e secá-los. Além disso, durante a montagem do molde, após a aplicação de desmoldante despende-se de uma elevada quantidade de tempo a apertar e desapertar, parafusos e porcas. Durante este processo, é necessário apertar os varões roscados, o sistema de enchimento e durante o processo de prensagem apertar os parafusos que garantem a posição do êmbolo. Após a prensagem é necessário desapertar o sistema de enchimento e por fim após a “cura” é necessário desapertar, os restantes parafusos e porcas.

A aplicação deste processo, em geometrias mais complexas, utilizando pó de cortiça como se pode verificar não representa uma opção viável, apesar de ser a solução mais ecológica.

Em suma, é possível obter peças de geometria complexa, resultantes de granulado de cortiça, utilizando baixas percentagens de cola e tempos de “cura” reduzidos, obtendo resultados bastante positivos. Por outro lado, a preparação deste processo é dispendiosa no que diz respeito ao tempo necessário para realização da mesma.

6.1. Enquadramento

A grande utilização dos processos de maquinagem deve-se à diversidade de geometrias que podem ser maquinadas, ao alto grau de precisão dimensional, acabamento superficial e ao facto de não haver alteração nas propriedades do material durante as operações de fabrico. Estas características fazem com que na grande maioria dos casos, os processos de maquinagem não possam ser substituídos por nenhum outro processo de fabrico.

O processo de fresagem é dos processos mais utilizados, que consiste numa operação onde o material é levantado por corte de arranque de apra por uma ferramenta rotativa de aresta múltipla, a fresa, sendo esta operação realizada por uma maquina denominada fresadora. Podem ser realizadas outras operações numa fresadora, tais como a furação, mandrilagem e roscagem. Através deste processo é possível obter peças com variadas geometrias, desde peças com superfícies planas a peças com entalhes e geometrias mais complexas (Santos, 2013).

De uma maneira geral, tal como acontece no centro de maquinagem de 3 eixos existente no Departamento de Engenharia Mecânica, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, a ferramenta gira em torno de um eixo de rotação, deslocando-se apenas verticalmente, e a peça a fresar é deslocada manual ou automaticamente para a ferramenta. Como acontece em todo tipo de maquinagem que envolve movimento relativo peça-ferramenta, a velocidade do movimento é condicionada, fundamentalmente, pelo tipo de material a maquinar e por sua vez condiciona o seu acabamento superficial. Por outro lado, no centro de maquinagem de 5 eixos existente no Departamento de Engenharia Mecânica, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra a ferramenta desloca-se segundo os eixos de translação “X”, “Y” e “Z”, rodando a mesa de trabalho sobre o eixo Y (designado eixo de rotação B) e sobre o eixo Z (designado eixo de rotação C). Na Figura 6.1 está representada nomenclatura dos eixos de translação e rotação possíveis de existir nos equipamentos CNC onde:

- O eixo que roda em torno do eixo X é designado de eixo A.
- O eixo que roda em torno do eixo Y é designado de eixo B.
- O eixo que roda em torno do eixo Z é designado por C.

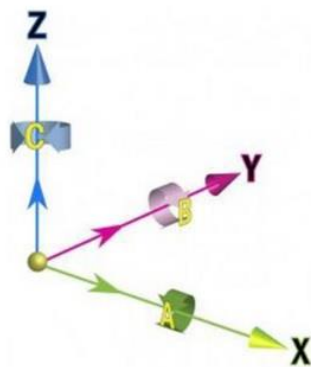


Figura 6.1 - Nomenclatura do Sistema de Eixos Lineares e Rotativos (Mendes, 2016)

Numa fase inicial do trabalho foi feita uma aprendizagem mais aprofundada ao nível da maquinagem de 3 eixos, onde se começou por aprender determinados procedimentos de rotina, tais como medição de altura de ferramentas e determinação do zero-peça. Seguidamente foi efetuada uma aprendizagem ao nível do software de fabrico assistido por computador, Mastercam® X9, tendo em vista o fabrico de uma peça proposta por professores do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Posteriormente foi feita a mesma aprendizagem ao nível da maquinagem de 5 eixos no centro de maquinagem HAAS UMC 750SS, onde também após essa aprendizagem foi fabricada a mesma peça, proposta anteriormente para o centro de maquinagem de 3 eixos. Ao longo do ano letivo foram realizados outros trabalhos para diferentes fins, tendo sido selecionado para ser apresentado no subcapítulo 6.2 o trabalho designado “Suporte”.

6.2 Exemplo de trabalho realizado: Suporte

6.2.1 Maquinagem a 3 eixos

6.2.1.1 Bloco e zero-peça

Na maquinagem a 3 eixos foi utilizado um material polimérico, onde o bloco inicial continha as dimensões indicadas na Figura 6.2:

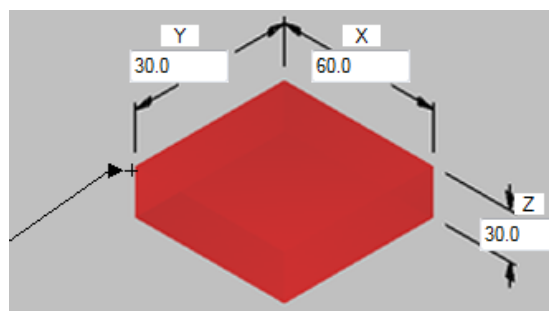


Figura 6.2 -Dimensões do bloco usado na maquinagem a 3 eixos

Os apertos utilizados no fabrico desta peça, tal como a localização dos respetivos zero-peça, encontram-se indicados na Figura 6.3 :

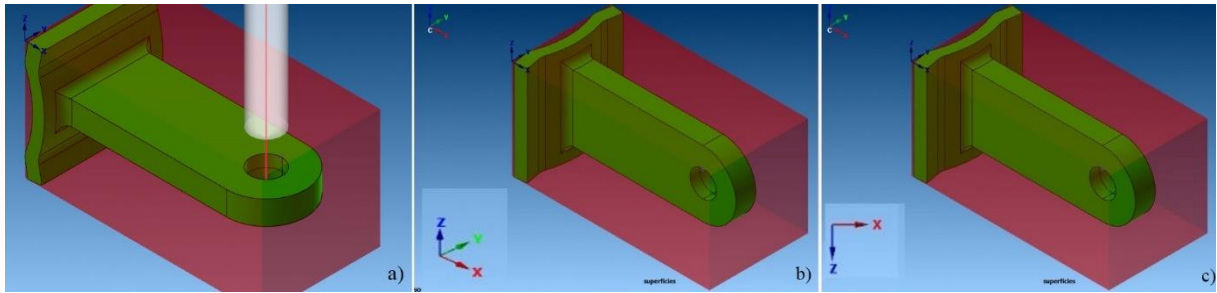


Figura 6.3 – Posicionamento do suporte e respetivo zero-peça: a) Aperto 1; b) Aperto 2; c) Aperto3

Foram necessários 3 apertos para maquinar esta peça. onde o primeiro aperto serviu apenas para realizar a operação de furação. Quanto aos outros dois apertos utilizados, o segundo aperto foi usado para maquinar a parte superior da peça e o terceiro aperto para maquinar o restante material. Nos apertos 2 e 3 o suporte foi maquinado até metade da altura total, não se distinguindo de forma clara, uma vez que a geometria a maquinar na parte superior é simétrica à geometria a maquinar na parte inferior.

6.2.1.2 Ciclos de maquinagem e simulação do processo

Os ciclos de maquinagem selecionados para o fabrico desta peça, encontram-se indicados na Figura 6.4 , sendo apresentado na figura 6.5 e 6.6 a simulação do resultado obtido em diferentes etapas.

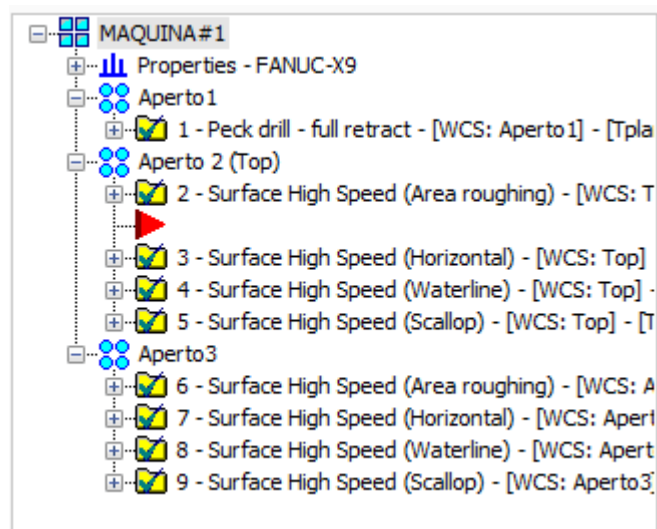


Figura 6.4 - Ciclos de maquinagem utilizados

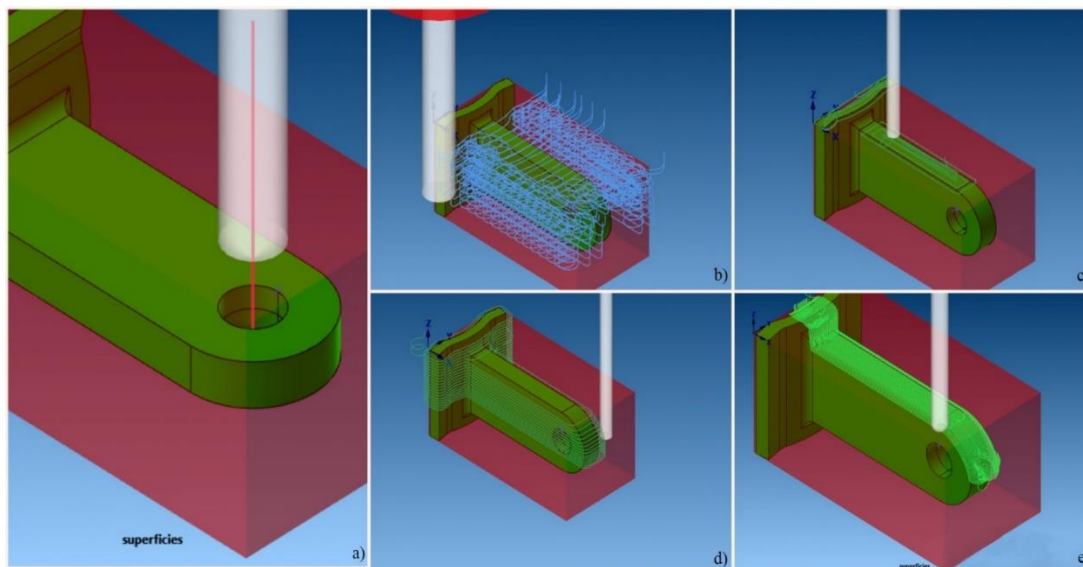


Figura 6.5 - Trajetória das ferramentas no aperto 1 e 2: a) Ciclo 1; b) Ciclo 2; c) Ciclo 3; d) Ciclo 4; e) Ciclo 5

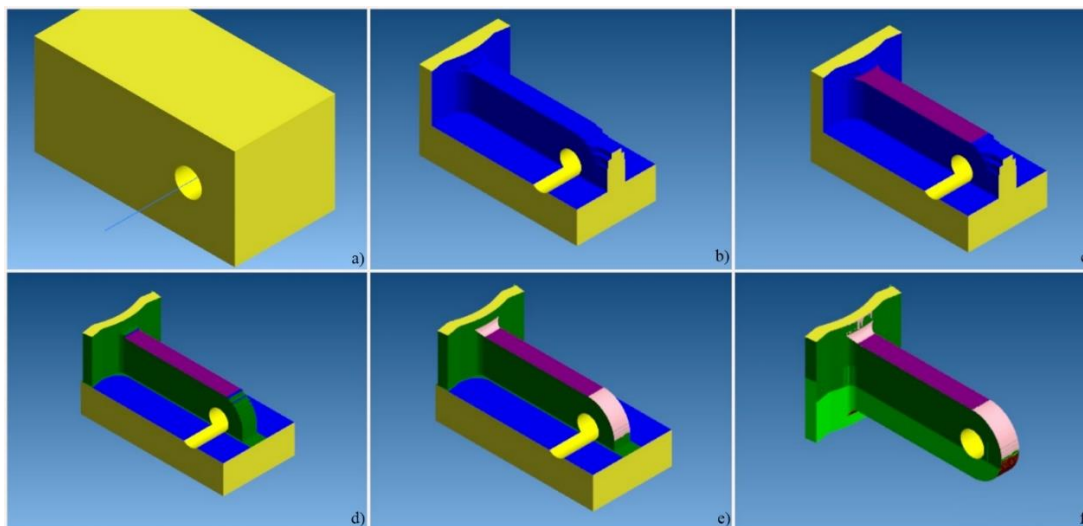


Figura 6.6 - Simulação do processo de maquinagem no Software Mastercam® X9: a) Ciclo 1; b) Ciclo 2; c) Ciclo 3; d) Ciclo 4; e) Ciclo 5; f) Ciclos 6 a 9 (3º aperto)

O primeiro aperto, tal como foi mencionado anteriormente, foi apenas usado para executar a operação de furação. O furo foi realizado com incrementos, utilizando o ciclo “Peck Drill”. Seguidamente, no segundo aperto foi feito um ciclo de desbaste (“Area Roughing”), onde se removeu a maior parte do material, restando apenas o material para acabamento. Posteriormente, foi realizado o ciclo de acabamento “Horizontal” que é adequado para acabar superfícies horizontais ou com pouco declive, seguido de um ciclo “Waterline” que é um ciclo adequado para acabar superfícies verticais ou de grande declive. Para finalizar as operações do segundo aperto, foi utilizado o ciclo “Scallop”, vocacionado para acabar superfícies curvas ou onduladas. Por fim, no terceiro aperto foram realizadas as mesmas operações, utilizadas no segundo aperto, pois a geometria a maquinar nesta etapa é simétrica à etapa anterior. Em todas as operações realizadas, o bloco de material que deu origem ao suporte, foi apertado numa prensa que é possível observar na Figura 6.7 a).

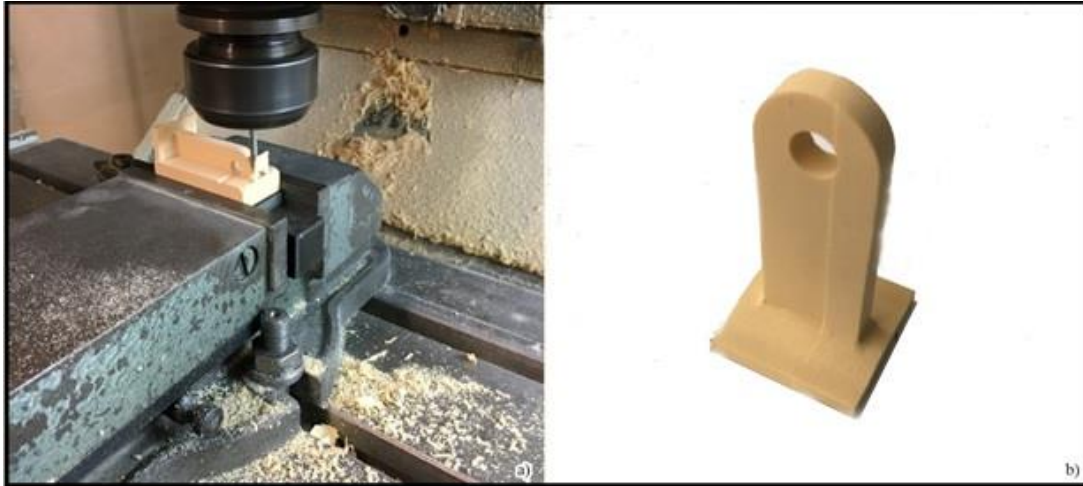


Figura 6.7 - Processo de Maquinagem: a) Execução da peça durante o segundo aperto; b) Resultado Final

Na Figura 6.7 a), observa-se a maquinagem na parte final do segundo aperto, e na Figura 6.7 b) o resultado final obtido.

6.2.2 Maquinagem a 5 eixos

6.2.2.1 Bloco e zero-peça

Na maquinagem a 5 eixos o material utilizado foi uma liga alumínio, onde as dimensões mínimas do bloco inicial se encontram indicadas na Figura 6.8:

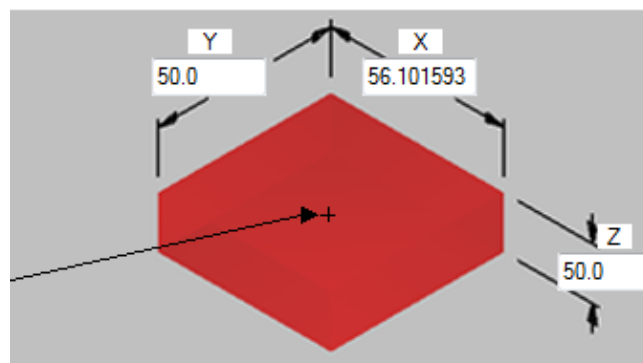


Figura 6.8 - Dimensões mínimas do bloco

Neste caso apenas foram necessários apenas dois apertos para fabricar a peça, pois foram utilizados os eixos rotativos do centro de maquinagem. No primeiro aperto foi executada a operação de furação e a grande maioria dos ciclos de maquinagem. O segundo aperto foi utilizado apenas para finalizar a peça. O posicionamento da peça no aperto 1 encontra-se representado na Figura 6.9, tendo sido necessário utilizar um bloco mais alto do que a altura

mínima necessária, de modo que durante a rotação dos eixos de maquinagem, sejam evitadas colisões entre a árvore que suporta a ferramenta e o bloco a maquinar.

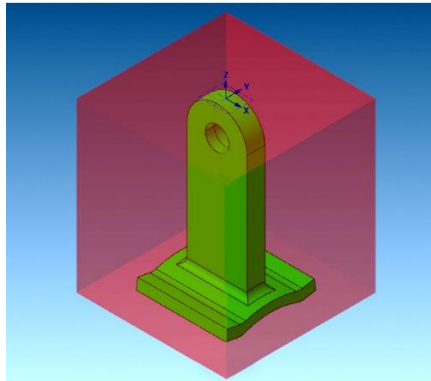


Figura 6.9 - Aperto e Zero-Peça utilizados

6.2.2.2 Ciclos de maquinagem e simulação do processo

Os ciclos de maquinagem selecionados para o fabrico desta peça, encontram-se indicados na Figura 6.10, sendo apresentado nas Figura 6.11, Figura 6.12 e Figura 6.13 a simulação do resultado obtido em diferentes etapas.

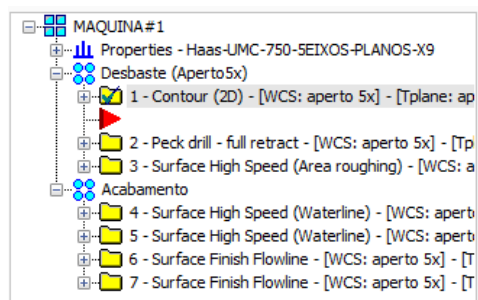


Figura 6.10 - Ciclos de maquinagem utilizados

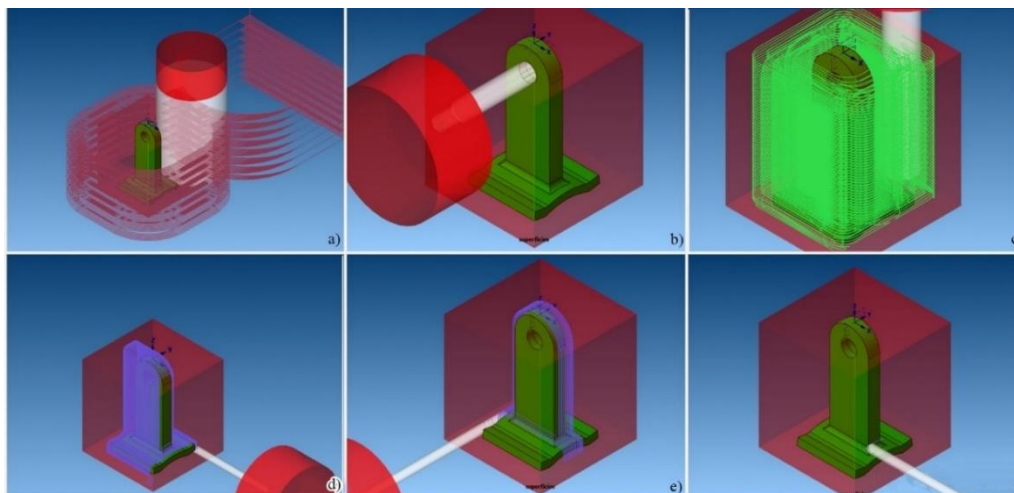


Figura 6.11 - Trajetória das ferramentas: a) Ciclo 1; b) Ciclo 2; c) Ciclo 3; d) Ciclo 4; e) Ciclo 5; f) Ciclo 6 e 7

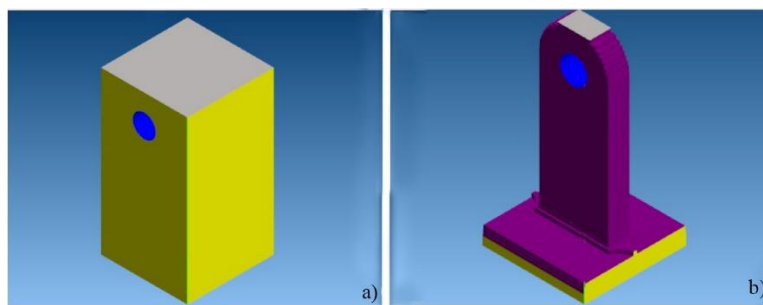


Figura 6.12 - Simulação no software Mastercam® X9: a) Ciclo 2; b) Ciclo 3

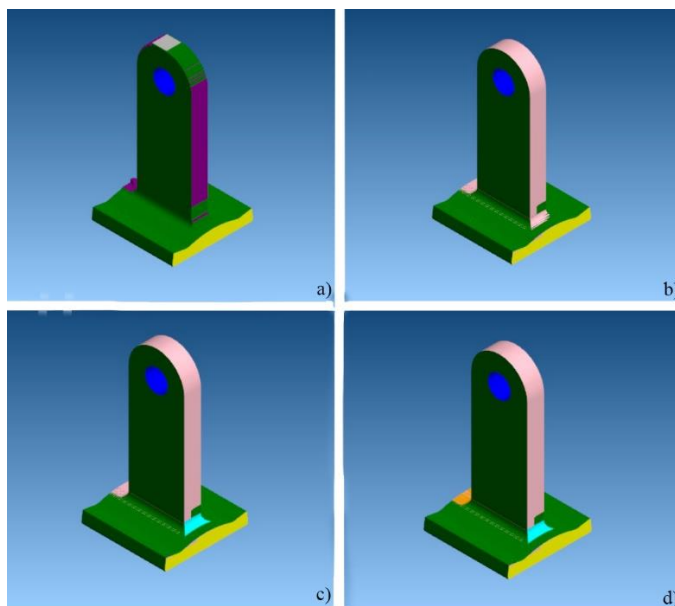


Figura 6.13 - Simulação no software Mastercam® X9: a) Ciclo 4 ; b) Ciclo 5; c) Ciclo 6; d) Ciclo 7

No primeiro aperto, inicialmente foi usado um ciclo “Contour”, utilizando uma roca, uma vez que o bloco de alumínio fornecido apresentava dimensões demasiado elevadas tendo em conta o tamanho da peça. Seguidamente, foi usado o ciclo “Peck Drill”, para realizar o furo, sendo este realizado com incrementos. Posteriormente, foi usado o ciclo de desbaste “Area Roughing”, deixando apenas o material para acabamento. De modo a realizar o acabamento da peça utilizou-se o ciclo “Waterline” duas vezes, para acabar as superfícies verticais, sendo rodada a mesa de trabalho entre as duas utilizações do ciclo “Waterline”. Por fim para acabar uma zona com um raio de curvatura de 2mm utilizou-se o ciclo “Finish Flowline” duas vezes, sendo rodada a mesa de trabalho entre as duas utilizações deste ciclo.

Na Figura 6.14 a) é observado o resultado obtido na parte final do primeiro aperto. A Figura 6.14 b) mostra como foi fixada a peça no segundo aperto, de modo a ser possível obter a forma final da peça.

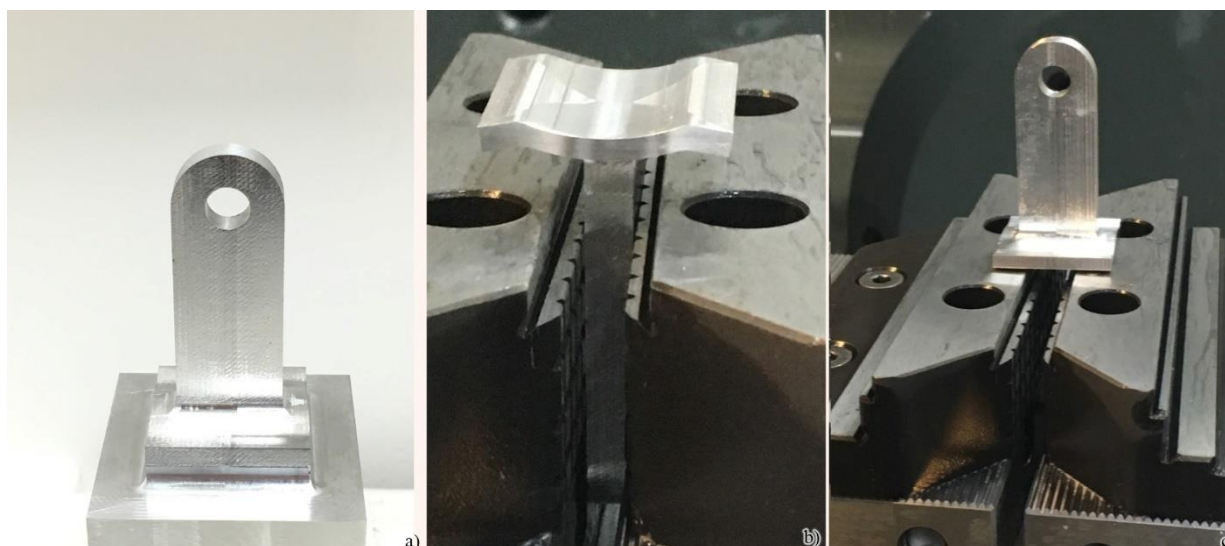


Figura 6.14 - Resultados obtidos: a) Final do primeiro aperto; b) Final do segundo aperto; c) Resultado Final

7.1 Conclusões

Após a realização deste trabalho, cujo propósito convergiu em torno da utilização das potencialidades das tecnologias CAD/CAM, é possível estabelecer algumas conclusões relativamente às condições definidas, ao longo dos diferentes capítulos, as quais se apresentam de seguida.

Relativamente ao capítulo 3, onde, o seu propósito foi a criação de um sistema que permitisse obter valores de aceleração, através da aquisição de sinais de vibração provenientes de um acelerómetro triaxial. Foi integrado neste trabalho o fabrico de uma peça para fixar o acelerómetro, à árvore da fresadora, a qual se pode concluir que serviu o seu propósito. Esta aplicação permitiu responder às necessidades na sequência da realização dos ensaios.

A realização dos ensaios de aquisição do sinal do acelerómetro, permitiu concluir que a análise da evolução do desgaste na ferramenta de corte, é possível através da análise e interpretação dos sinais adquiridos, tais como, FFT e oitavas. Conclui-se que na maquinagem do aço inox duplex, a evolução do desgaste dos gumes de corte da ferramenta, foi de acordo com a curva padrão de evolução do desgaste de flanco ao longo do tempo.

Além disso, após a análise dos sinais adquiridos (tanto em FFT, como em oitavas) é possível concluir que, a sua utilização permite detetar situações de maquinagem adversa. Por fim, após a deteção de falhas é possível, otimizar os parâmetros de corte de modo a reduzir os custos de maquinagem e, aumentar o tempo de vida útil da ferramenta. Finalmente, uma vantagem importante da realização destas análises é que, os dados obtidos (valores de aceleração) nos ensaios realizados, podem ser utilizados para prever o desgaste da ferramenta.

No capítulo 4, o objetivo foi prever o desgaste da ferramenta, utilizando os valores obtidos nos ensaios realizados no capítulo 3. Tendo em vista servir este propósito foi criado um modelo ANFIS com 3 entradas (velocidade de corte, tempo e RMS) e uma saída (desgaste médio dos gumes de corte). Este modelo permitiu responder às necessidades de funcionamento do modelo, de modo a efetuar as previsões do desgaste da ferramenta, de acordo com a norma ISO 8688-1. No entanto, apesar deste modelo estar limitado apenas à previsão do desgaste dos parâmetros de teste, provenientes dos ensaios realizados, os resultados obtidos foram bastante positivos, e pode-se concluir que este modelo serve o seu propósito. Por fim, pode-se concluir que este

modelo apresenta resultados promissores, no sentido de tornar possível a previsão do desgaste da ferramenta, sem ser necessário efetuar o processo de maquinagem.

Seguidamente, no capítulo 5 o objetivo passou por compactar aglomerados de cortiça, tendo em vista a obter uma peça de geometria complexa.

Ao testar a aplicação deste sistema, notou-se um problema na geometria do molde que iria causar retenção de algum material no processo de prensagem. Como forma de colmatar este problema foram realizadas alterações na geometria do molde e de outros componentes. De seguida, foram posto à prova se as modificações realizadas, no desenho inicial, eram suficientes para obter uma peça de geometria complexa. Após a realização dos ensaios, e de acordo com os resultados obtidos, é possível concluir que as modificações efetuadas permitiram a obtenção de peças com geometria complexa. Por outro lado, identificou-se que o sistema apresenta algumas limitações ao nível do tempo necessário para a remoção da cola e para a montagem do molde.

De uma maneira geral, os objetivos de cada capítulo foram cumpridos. Porém, existem algumas limitações e que por esse motivo, seguidamente serão sugeridas algumas possíveis melhorias futuras.

7.2 Propostas de trabalhos futuros

Relativamente a trabalhos futuros que se consideram pertinentes desenvolver no seguimento deste trabalho, indicam-se os seguintes:

- Elaborar um modelo ANFIS com o objetivo de prever o valor de RMS, o qual seria utilizado no modelo ANFIS para previsão do desgaste, de modo a ser possível obter uma previsão do desgaste sem ser necessário realizar o processo de maquinagem;
- Elaborar um outro modelo ANFIS que utilize outros parâmetros de corte e, que o seu propósito seja prever outro tipo de parâmetro que se afigure de interesse;
- Aplicar metodologias do tipo “Desirability” (desejabilidade) ou “Simplex”, para otimização dos parâmetros de corte a utilizar, de modo a obter o melhor rácio entre a taxa de remoção de material e o tempo de vida útil da ferramenta de corte;
- Medição de forças, de potência e temperatura de corte na maquinagem de aços inoxidáveis duplex;
- Otimizar o processo de remoção de cola e, de montagem do molde de compactação de cortiça;
- Reduzir as dimensões do molde e criar um procedimento e automatismo que torne viável a produção em série de produtos de cortiça compactados, os quais apresentem algum/elevado grau de complexidade geométrica;
- Realizar ensaios de compactação de granulado de cortiça em geometrias mais complexas, tais com caixas, ilhas, zonas confinadas e paredes de baixa espessura.

- Access. (2017). *Basic principles of fuzzy logic*. Obtido de Acess: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2012080002> [Consultado a 6 de Maio de 2017]
- Alegre, P. H. (2017). *Desgaste em Ferramentas de Corte*. Obtido de Ebah: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAfQ2wAI/desgaste-ferramentas-corte> [Consultado a 10 de Abril de 2017]
- Amaro, P. M. (2017). *Maquinabilidade dos Aços Inoxidáveis: Estudo Experimental da Degradação da Ferramenta no corte do Aço Inoxidável Duplex*. Coimbra.
- Anselmo, D., Marcondes, F., & Coppini, N. (2013). *Tecnologia da Usinagem Dos Materiais - 8ª Ed*. Artliber.
- BSSA. (2017). *Chemical composition of stainless steel castings to BS EN 10283*. Obtido de BSSA: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=152> [Consultado a 20 de Julho de 2017]
- BSSA. (2017). *Duplex Stainless Steels - A Simplified Guide*. Obtido de BSSA: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=668> [Consultado a 6 de Maio de 2017]
- Carbó, E. H. (2008). *Aços Inoxidáveis: Aplicações e Especificações*. ArcelorMittal.
- Centimfe. (2003). *Manual do projectista para moldes de injeção de plástico*. Centimfe - Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e.
- European Cork Federation. (2017). *Código Internacional das Práticas Rolheiras*. Obtido de UP: https://ciencia20.up.pt/attachments/article/577/rec_3_CIPR2011PT.pdf [Consultado a 20 de Julho de 2017]
- Ferreira, P. M. (2015). *Estudo da maquinabilidade das ligas Ti-6Al-4V e Co-28Cr-6Mo na fresagem de dispositivos biomédicos*. Aveiro.
- FunctionBay. (2017). *Defuzzification*. Obtido de FunctionBay: <http://www.functionbay.co.kr/documentation/onlinehelp/default.htm#!Documents/defuzzification.htm> [Consultado a 15 de Maio de 2017]

- G.Anuradha. (2017). *ANFIS (Adaptive Network Fuzzy Inference system)* . Obtido de Anuradhasrinivas: <https://anuradhasrinivas.files.wordpress.com/2013/10/anfis.ppt> [Consultado a 15 de Maio de 2017]
- Gil, L. (2012). *Cortiça*. Obtido de LNEG: repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/1582/1/LivroMateriais_cap13_Cortiça.pdf [Consultado a 28 de Fevereiro de 2017]
- GlobalSpec. (2017). *ICP® Accelerometer -- 356B08*. <http://datasheets.globalspec.com/ds/5/pcb/3C1B37F9-F18E-4BF6-924A-8A244E314779>. [Consultado a 22 de Março de 2017]
- González, D. M. (2013). *MÉTODO DE GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS TROCOIDAI E ESPIRAIS COMBINADAS PARA O FRESAMENTO DE DESBASTE DE CAVIDADES 2,5D COM MÚLTIPLAS FERRAMENTAS*. Florianópolis.
- Hecht, G. W. (2017). *The Nyquist Sampling Theorem*. Obtido de Spot: <http://www.spot.pcc.edu/~ghecht/Gary's%20Nyquist%20Document.pdf> [Consultado a 3 de Julho de 2017]
- IMOA. (2012). *Orientações práticas para o processamento dos aços inoxidáveis Duplex 2ªed*. Londres,UK: International Molybdenum Association.
- Infomet. (2017). *Aços & Ligas / Aços e Ferros Fundidos / Aços Resistentes à Corrosão*. Obtido de Infomet: <http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=109> [Consultado a 20 de Julho de 2017]
- ISO-8688-1. (1989). *Tool life testing in milling - Parte 1: Face milling. s.l.:International*.
- Machado, Á. R., Coelho, R. T., Abrão, A. M., & da Silva, M. B. (2009). *Teoria da Usinagem dos Materiais. 1.ª ed*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda.
- Mastercam. (2015). *Westeconline*. Obtido de Dynamics of High Speed Material Removal: <http://westeconline.com/wp-content/uploads/2015/09/Mylek-Stas-They-Dynamics-of-High-Speed-Material-Removal.pdf> [Consultado a 15 de Maio de 2017]
- MathWorks. (2017). *What Is Mamdani-Type Fuzzy Inference?* Obtido de MathWorks: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-mamdani-type-fuzzy-inference.html> [Consultado a 15 de Maio de 2017]
- Mendes, A. V. (2016). *Caracterização de um Centro de Maquinagem a 5 Eixos e Implementação de um Sistema de Aquisição de Vibração*. Coimbra.
- MFGTechUpdate. (2017). *A curve is the shortest path* . Obtido de MFGTechUpdate: <https://mfgtechupdate.com/2016/08/curve-shortest-path/> [Consultado a 20 de Julho de 2017]
- National Instruments. (2017). *Ensinando conceitos difíceis: domínio da frequência em medições*. Obtido de National Instruments: <http://www.ni.com/white-paper/13419/pt/> [Consultado a 30 de Maio de 2017]

- NUUA. (2017). *Lecture05-Defuzzification*. Obtido de NUUA: <http://gc.nuaa.edu.cn/cse/fmc/download/Lecture05-Defuzzification.pdf> [Consultado a 24 de Julho de 2017]
- OBS. (2017). *MATLAB Function Reference*. Obtido de OBS: <http://www.obs.ujf-grenoble.fr/scci/logiciels/matlab61/help/techdoc/ref/fft.html> [Consultado a 20 de Julho de 2017]
- PCB. (2017). *Model 356B08 Triaxial, high sensitivity, ceramic shear ICP® accel., 100 mV/g, 0.5 to 5k Hz, Installation and Operating Manual*. Obtido de PCB: https://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/Products/Manuals/356B08.pdf [Consultado a 22 de Março de 2017]
- Pinto, G. F. (2007). *Identificar e testar técnicas baseadas em Redes Neurais e Lógica Difusa para o Controlo de Semáforos em Tráfego Urbano*. Porto.
- Raol, J. R. (2015). *Data Fusion Mathematics: Theory and Practice*. CRC Press.
- RELACRE. (2014). *GUIA DE BOAS PRÁTICAS DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES*.
- Ribeiro, L., Pinto, F., & Barros, P. (2014). *Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias*. Coimbra.
- Sandvik. (2010). *Manual Técnico*. Elanders.
- Sandvik. (2017). *Desgaste da ferramenta*. Obtido de Sandvik: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/pages/default.aspx [Consultado a 24 de Julho de 2017]
- Sandvik. (2017). *Fórmulas*. Obtido de Sandvik: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/formulas_and_definitions/formulas/pages/default.aspx [Consultado a 20 de Julho de 2017]
- Santos, P. J. (2013). *Tecnologia CAM Aplicada no Fabrico por Fresagem de Componentes Mecânicos Caracterização do processo de fresagem e dos componentes*. Coimbra.
- Silva, C. W. (2000). *Vibration Fundamentals and Practice*. CRC Press.
- TechTarget. (2017). *time-division multiplexing (TDM)*. Obtido de TechTarget: <http://whatistechtarget.com/definition/time-division-multiplexing-TDM> [Consultado a 16 de Agosto de 2017]
- USP. (2017). *Redes Neurais Artificiais*. Obtido de USP: <http://conteudo.icmc.usp.br/pessoas/andre/research/neural/> [Consultado a 30 de Maio de 2017]